



Estudo de reator de digestão anaeróbia de lamas de ETAR

JULIANA SOFIA DE BARROS MARTINS

outubro de 2019

Mestrado em Engenharia Química

Estudo de reator de digestão anaeróbia de lamas de ETAR

Relatório de Juliana Martins (1141163)

**Desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Estágio
submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Química,**

Ramo de Energia e Biorrefinaria



Departamento de Engenharia Química

Orientadores no ISEP: Eng.^a Sónia Figueiredo | Eng.^a Nídia Sá Caetano

Orientador na empresa: Eng.^a Raquel Teixeira da Silva | Dr. Ricardo Couto

Outubro de 2019

Agradecimentos

À Engenheira Raquel Teixeira da Silva e ao Ricardo Couto que possibilitaram a realização deste estágio, oferecendo todas as condições de trabalho, dedicação, empenho e força de acreditar.

À equipa que me acompanhou nestes 6 meses, o Engenheiro Miguel Pereira, Engenheira Luísa Lopes, Engenheira Margarida Silva, os operadores (Zé Luís, Arsénio, Rui, Luís e Tiago) e à minha amiga e companheira, Ana Sofia Esteves, que estiveram sempre prontos a ajudar, que sempre me fizeram sentir à vontade e por sempre me apoiarem.

Às orientadoras, Doutora Nídia Caetano e Doutora Sónia Figueiredo, por todo o apoio, suporte e orientação durante este percurso.

Aos meus pais que possibilitaram a realização deste sonho.

Ao Rui, pela paciência, compreensão e pelo apoio incondicional que sempre me deu.

Aos meus amigos, que sofreram comigo durante estes 6 meses pelas angústias vividas e por me darem força para que tudo desse certo.

Resumo

O objetivo deste trabalho realizado no âmbito da unidade curricular “Dissertação/Estágio” do Mestrado em Engenharia Química – Energia e Biorrefinaria na Estação de Tratamentos de Águas Residuais (ETAR) de Paço de Sousa da SIMDOURO, foi o desenvolvimento de uma instalação piloto de um digestor anaeróbio que permitisse estudar a influência de vários parâmetros do processo, tais como a proporção de lamas primárias e secundárias, na alimentação ao digestor, e a temperatura do processo, na produção de biogás.

Para que este objetivo fosse atingido, foram montados 5 reatores em paralelo, e em duplicado, com proporções diferentes de lamas primárias (LP) e secundárias (LS): 100%, 60%, 50% e 40% de LP e 100% LS. Esta montagem foi sujeita a três diferentes temperaturas do banho termostático onde estes reatores estavam mergulhados, de forma a poder estudar o efeito da temperatura na gama mesófila (38 - 42 °C).

Durante este estudo foi medido o volume de biogás produzido, ao longo de 20 dias, e sempre que possível foi também determinada a sua composição (percentagem de metano, dióxido de carbono, oxigénio e sulfureto de hidrogénio). Foram realizadas análises laboratoriais às lamas de cada reator (sólidos totais, sólidos voláteis, alcalinidade, ácidos gordos voláteis, pH e temperatura) antes e depois de cada ensaio, o que permitiu estimar a produção de biogás esperada a partir da degradação dos sólidos voláteis.

De acordo com a literatura esperava-se uma maior produção de biogás à temperatura de 38 °C, diminuindo à medida que esta se aproxima da gama termófila, o que se confirmou em termos de conversão de sólidos voláteis. No entanto, os resultados experimentais nem sempre demonstram o previsto relativamente à produção de biogás, obtendo-se em alguns casos maiores produções nas temperaturas mais altas, sendo os resultados coerentes entre os reatores duplicados. Nestes últimos ensaios já tinham minimizadas as fugas de biogás tendo melhorado o funcionamento da instalação.

De uma forma geral, a nível experimental obteve-se uma maior produção de biogás nos reatores com maior proporção de lamas primárias, o que está de acordo com o previsto pela literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Lamas primárias, Lamas secundárias, Temperatura.

Abstract

The objective of this work carried out in the course “Dissertation / Internship” of the Master in Chemical Engineering - Energy and Biorefinery at SIMDOURO's Paço de Sousa Wastewater Treatment Plant (WWTP) was the development of a pilot installation of a anaerobic digester to study the influence of various process parameters, such as the proportion of primary and secondary sludge, on the feed to the digester, and the process temperature on biogas production.

To achieve this goal, 5 reactors were assembled in parallel and in duplicate, with different proportions of primary (PS) and secondary (SS) sludge: 100%, 60%, 50% and 40% of PS and 100% SS. This assembly was subjected to three different temperatures of the thermostatic bath where these reactors were immersed, in order to study the effect of temperature in the mesophilic range (38 - 42 °C).

During this study the volume of biogas produced over 20 days was measured and whenever possible its composition (percentage of methane, carbon dioxide, oxygen and hydrogen sulfide) was also determined. Laboratory analyzes were performed on the sludge of each reactor (total solids, volatile solids, alkalinity, volatile fatty acids, pH and temperature) before and after each test, allowing to estimate the expected biogas production from the volatile solids degradation.

According to the literature, a higher biogas production was expected at a temperature of 38 °C, decreasing as it approaches the thermophilic range, which was confirmed in terms of the conversion of volatile solids. However, the experimental results do not always demonstrate the predicted biogas production, and in some cases higher yields are obtained at higher temperatures, and the results are consistent between duplicate reactors. In these last tests biogas leakage had already been minimized and the operation of the plant has been improved.

In general, at the experimental level, a higher production of biogas was obtained in reactors with higher proportion of primary sludge, which is in accordance with the literature.

KEY WORDS: Biogas, Primary Sludge, Secondary Sludge, Temperature.

Índice

Nomenclatura.....	xvii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Organização do relatório.....	2
2. ETAR de Paço de Sousa	5
2.1 SIMDOURO	5
2.2 Apresentação da ETAR	6
2.3 Etapas de tratamento.....	7
2.3.1 Linha líquida.....	10
2.3.1.1 Tratamento preliminar	10
Elevação Inicial	10
Gradagem/Tamisagem	10
2.3.1.2 Tratamento Primário.....	11
Desarenamento	12
Desengorduramento	12
Decantação lamelar	12
2.3.1.3 Tratamento secundário.....	13
2.3.1.4 Tratamento terciário.....	15
Desinfecção por radiação ultravioleta (UV)	15
Reutilização do efluente tratado após microfiltração e desinfecção com radiação UV	16
2.3.2 Tratamento das Lamas/Linha sólida.....	17
2.3.2.1 Extração e espessamento de lamas	17
Espessamento gravítico das lamas primárias	17

Espessamento das lamas biológicas em excesso.....	18
2.3.2.2 Armazenamento das lamas espessadas	18
2.3.2.3 Digestão Anaeróbia de Lamas	19
Linha de Biogás.....	20
Aquecimento de lamas	21
Cogeração.....	21
2.3.2.4 Desidratação de lamas	22
3. Conceitos teóricos sobre a digestão anaeróbia	25
3.1 Etapas da digestão anaeróbia	25
3.2 Vantagens e Desvantagens	28
3.3 Parâmetros que influenciam a digestão anaeróbia.....	30
3.3.1.1 Temperatura.....	30
3.3.1.2 pH	32
3.3.1.3 Alcalinidade e ácidos voláteis	32
3.3.1.4 TRH e TRS	32
3.3.1.5 Homogeneidade	33
3.3.1.6 Carga orgânica.....	34
3.3.1.7 Nutrientes (Razão C/N)	34
3.3.1.8 Compostos tóxicos ou inibidores.....	35
3.3.1.9 Teor de sólidos.....	35
3.3.1.10 Potencial Redox	36
3.4 Produtos da Digestão Anaeróbia	37
3.5 Mecanismos da digestão anaeróbia	38
4. Descrição experimental	41
4.1 Caracterização das lamas	41
pH e Temperatura.....	41
Sólidos Totais (ST)	41

Sólidos Voláteis (SV).....	42
Alcalinidade (ALC).....	42
Ácidos gordos voláteis (AGV).....	43
4.2 Descrição do funcionamento do Digestor anaeróbio da ETAR de Paço de Sousa	44
4.3 Instalação piloto.....	45
4.3.1 Descrição da instalação.....	45
4.3.2 Funcionamento da instalação.....	48
5. Resultados e Discussão.....	51
5.1 Resultados esperados	56
5.2 Resultados obtidos	60
5.3 Média de produção de biogás diária	78
6. Conclusões.....	80
Bibliografia.....	79
Anexos.....	83
A. Cálculo da proporção de lamas a utilizar na instalação piloto.....	83
B. Cálculo dos valores esperados	87
C. Redução da Matéria Volátil	90
D. Qualidade do biogás	92

Índice de figuras

Figura 2. 1 Mapa do sistema de recolha de águas residuais urbanas de Paço de Sousa [3].	6
Figura 2. 2 Esquema geral das etapas de cada tratamento [4].	9
Figura 2. 3 Etapas do tratamento preliminar.	11
Figura 2. 4 Etapas do tratamento primário.	13
Figura 2. 5 Diferentes fases do tratamento secundário [5].	15
Figura 2. 6 Etapas do tratamento terciário.	16
Figura 2. 7 Circuito do biogás e armazenamento [5].	21
Figura 2. 8 Etapas do tratamento de lamas.	23
Figura 3. 1 Processo da digestão anaeróbia [6].	28
Figura 3. 2 Variação da gama de microrganismos consoante a temperatura e a taxa de crescimento das metanogénicas [11].	31
Figura 3. 3 Diagrama esquemático da conversão de sólidos voláteis em gases e lamas digeridas [17].	38
Figura 4. 1 Estratificação de um digestor anaeróbio [17].	44
Figura 4. 2 Instalação piloto.	46
Figura 5. 1 Resultados esperados para os diferentes ensaios.	57
Figura 5. 2 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.	61
Figura 5. 3 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.	61
Figura 5. 4 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 5 e 6, com substrato 50% de LP e 50% LS.	61
Figura 5. 5 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.	61
Figura 5. 6 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.	61
Figura 5. 7 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 2.	62
Figura 5. 8 Gráfico global do ensaio 2, com os 5 resultados mais representativos.	63

Figura 5. 9 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.	66
Figura 5. 10 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.	66
Figura 5. 11 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 5 e 6, com substrato 50% LP e 50% LS.	66
Figura 5. 12 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.	66
Figura 5. 13 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.	66
Figura 5. 14 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 3.	67
Figura 5. 15 Gráfico global do ensaio 3, com os 5 resultados mais representativos.	68
Figura 5. 19 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.	71
Figura 5. 20 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.	71
Figura 5. 17 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.	71
Figura 5. 18 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 5 e 6, com substrato 50% LP e 50% LS.	71
Figura 5. 16 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.	71
Figura 5. 21 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 4.	73
Figura 5. 22 Gráfico global do ensaio 4, com os 5 resultados mais representativos.	74
Figura 5. 23 Médias de produção diária de biogás nos ensaios 2, 3 e 4.	78
Figura A. 1 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.	84
Figura A. 2 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.	84
Figura A. 3 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 5 e 6, com substrato 50%/50%.	84
Figura A. 5 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.	84

Figura A. 4 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.	84
Figura A. 6 Gráfico global do ensaio 1, com os 5 resultados mais representativos.	85

Índice de tabelas

Tabela 3. 1 Compostos que inibem a DA e respectivas concentrações inibitórias [10]...	35
Tabela 3. 2 Potencial redox para os diferentes tipos de respiração [11].	36
Tabela 5. 1 Resultados laboratoriais do ensaio 2.....	52
Tabela 5. 2 Resultados laboratoriais do ensaio 3.....	53
Tabela 5. 3 Resultados laboratoriais do ensaio 4.....	54
Tabela 5. 4 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.8.....	64
Tabela 5. 5 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.15.....	69
Tabela 5. 6 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.22.....	76
Tabela A. 1 Volumes a adicionar de inóculo e substrato na proporção de 95% / 5%, respetivamente, a cada reator.....	83
Tabela A. 2 Volumes a adicionar de inóculo e substrato na proporção de 50% / 50%, respetivamente, a cada reator.....	86
Tabela B. 1 Produção de biogás esperada para os ensaios 2, 3 e 4.	89
Tabela C. 1 Redução da matéria volátil (%) nos diferentes ensaios, para as diferentes amostras.	91
Tabela D. 1 Qualidade do biogás durante o ensaio 2, a 38 °C.....	92
Tabela D. 2 Qualidade do biogás durante o ensaio 3, a 40 °C.....	93
Tabela D. 3 Qualidade do biogás durante o ensaio 4, a 42 °C.....	94

Nomenclatura

ADN - Ácido Desoxirribonucleico

AGV – Ácidos Gordos Voláteis

ALC - Alcalinidade

ARN - Ácido Ribonucleico

BMP - Potencial de Produção de Metano

DA – Digestão Anaeróbia

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

LP – Lamas Primárias

LS – Lamas Secundárias

OMS – Organização Mundial de Saúde

R – Reator

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TRH – Tempo de Retenção Hidráulico

TRS – Tempo de Retenção de Sólidos

UV – Radiação Ultravioleta

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Desde o início da humanidade, um dos recursos essenciais ao bem-estar e sobrevivência do ser humano é sem dúvida a água. A sua escassez ou o seu excesso e a má qualidade deste recurso são as principais causas de morte a nível mundial, quer devido a secas ou inundações, quer devido a contaminações (químicas ou microbiológicas) que tornam a água imprópria para consumo humano e causam doenças que levam à morte. O que vem sendo discutido também para além destes problemas é o uso em demasia deste recurso. Este, não é um recurso ilimitado e não havendo a consciência disso por parte do ser humano faz com que a taxa de consumo seja superior à de regeneração.

Assim sendo, e tendo em conta a importância deste recurso na sociedade, torna-se relevante preservar, proteger e melhorar a qualidade da água através da aplicação de políticas de desenvolvimento sustentável. É neste sentido onde se insere o tratamento de águas residuais urbanas que visa a melhoria da qualidade da água, da saúde e do ambiente.

Segundo os dados mais recentes da Organização Mundial de Saúde (OMS), cerca de 4,2 mil milhões de pessoas não têm qualquer acesso a saneamento básico seguro, ou seja, uma casa de banho ligada a um esgoto, das quais 3 mil milhões carecem de saneamento básico, ou seja, não têm casa de banho [1].

Comparativamente aos países desenvolvidos, nos países em desenvolvimento o impacto das descargas de águas residuais sem tratamento sobre os recursos hídricos é brutal. Tendo em conta todos os custos associados à construção de uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR) acrescenta, bem como o respetivo o consumo energético. Há que recorrer ao desenvolvimento e aplicação de tecnologias mais simples e por sua vez mais baratas. A digestão anaeróbia é uma alternativa interessante do ponto de vista económico devido à possibilidade de valorização energética do biogás produzido, e que pode ser aplicada como tratamento secundário, dependendo das características dos efluentes gerados, ou como tratamento das lamas geradas numa ETAR doméstica.

De facto, já tem sido aplicada em tratamentos de efluentes industriais, são pouco utilizadas em tratamentos de águas residuais domésticas.

Este trabalho vai recair na maximização da produção de biogás num digestor de lamas mistas de uma ETAR de água residual urbana, variando a percentagem de lamas primárias na alimentação de lama mista e da temperatura de funcionamento do reator anaeróbio.

1.2 Objetivos do trabalho

O trabalho desenvolvido encontra-se enquadrado no âmbito da unidade curricular “Dissertação/Estágio”, do 2º ano do mestrado em Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto e tem como principal objetivo o estudo de um reator de digestão anaeróbia de lamas mistas da ETAR de Paço de Sousa no sentido de otimizar a sua produção biogás, o qual após valorização energética permite a venda de energia à rede. Para cumprir este objetivo, foi necessário montar uma instalação à escala piloto, constituída por 10 reatores com capacidade máxima de 1,5 L, onde se realizaram ensaios com diferentes as proporções de lamas primárias/secundárias para a alimentação do digestor, e a diferentes temperaturas no processo de digestão. Em todos os ensaios foi medido o volume e determinada a composição do biogás, e foi também caracterizado o conteúdo de cada reator (ST/SV, AGV/ALC/pH e temperatura) no início e no fim de cada ensaio.

1.3 Organização do relatório

Este documento incide principalmente na digestão anaeróbia que é esta a etapa responsável pela produção de biogás. Este processo vai ser analisado ao pormenor de modo a apresentar quais as melhores condições em que o digestor deve trabalhar de modo a maximizar a produção de biogás.

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos. No presente capítulo introdutório apresenta-se o contexto em que se insere o trabalho, descrevendo os objetivos propostos e é apresentada a organização deste relatório.

No segundo capítulo, é feita uma descrição da ETAR de Paço de Sousa, começando pela apresentação da empresa SIMDOURO, passando depois para a descrição das diferentes etapas do tratamento.

No terceiro capítulo é feito o estudo do digestor anaeróbio, onde se destacam os parâmetros envolvidos neste processo, desde a alimentação das lamas ao controlo da temperatura e os produtos da digestão anaeróbia.

No quarto capítulo é feita a descrição experimental, destacando-se caracterização das lamas, a descrição do funcionamento do digestor anaeróbio e a instalação piloto.

O capítulo cinco apresenta os resultados do estudo, e a respetiva análise.

Finalmente no sexto capítulo, sintetizam-se os principais resultados obtidos e apresentam-se as conclusões do trabalho.

2. ETAR de Paço de Sousa

2.1 SIMDOURO

A SIMDOURO é uma sociedade anónima de capitais exclusivamente públicos, criada pelo Decreto-Lei 16/2017, de 01 de fevereiro, responsável pela construção, gestão e concessão do sistema multimunicipal de saneamento do grande Porto, por um prazo de 50 anos [2].

A principal missão desta empresa consiste em gerir e garantir a eficiência, qualidade do serviço e a sustentabilidade social e ambiental contribuindo ativamente para o desenvolvimento sustentável dos serviços de saneamento de águas residuais e para a concretização das metas estabelecidas para o setor [2].

Os principais objetivos da empresa são a recolha, tratamento e rejeição final das águas residuais urbanas de cerca de 519 mil habitantes. A SIMDOURO abrange uma área de cerca de 1300 km², compreendendo os municípios de Arouca, Baião, Castelo de Paiva, Cinfães, Paredes, Penafiel e Vila Nova de Gaia [2].

A SIMDOURO está dividida em dois centros de exploração:

- ✓ Gaia – Inclui todas as infraestruturas de saneamento “em alta” dos municípios de Vila Nova de Gaia.
- ✓ Douro e Sousa – Inclui todas as infraestruturas de saneamento “em alta” dos municípios de Arouca, Baião, Castelo de Paiva, Cinfães, Paredes e uma parte do município de Penafiel (bacia do rio Sousa).

2.2 Apresentação da ETAR

A ETAR de Paço de Sousa situa-se na freguesia de Paço de Sousa, município de Penafiel. A construção da ETAR de Paço de Sousa permitiu o desenvolvimento das redes de drenagem e a desativação de outras infraestruturas, como algumas elevatórias [3].

Esta ETAR está dimensionada para tratar 10.700 m³/dia de águas residuais domésticas, com capacidade de servir uma população de 65.000 habitantes [3].

A Figura 2.1 mostra o mapa do sistema de recolha de águas residuais urbanas de Paço de Sousa.

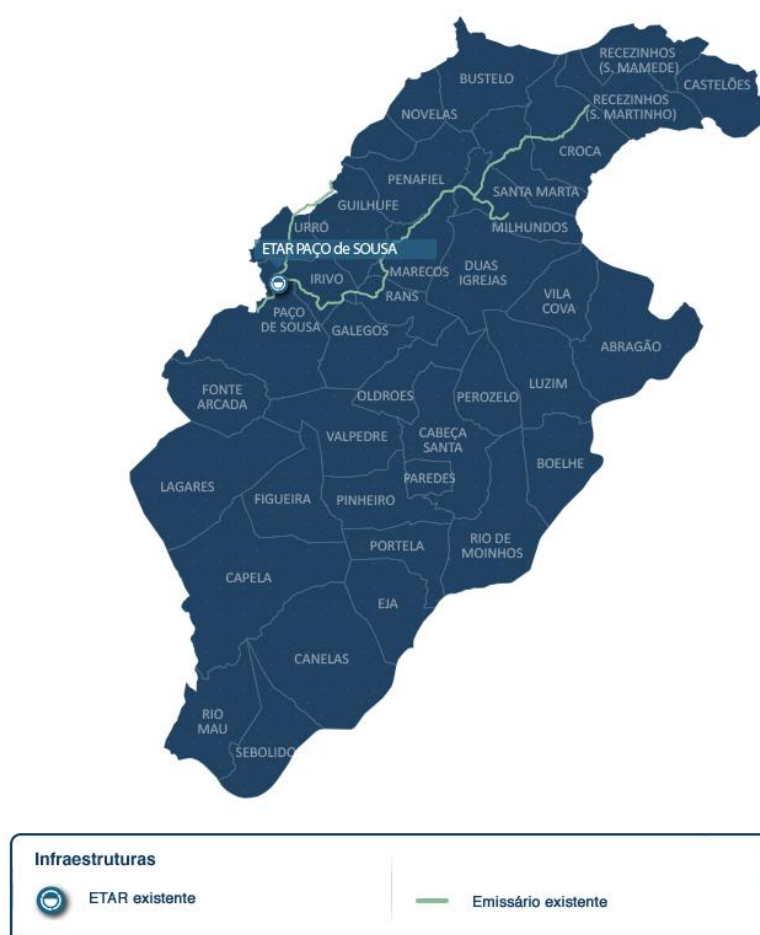


Figura 2. 1 Mapa do sistema de recolha de águas residuais urbanas de Paço de Sousa [3].

2.3 Etapas de tratamento

Todos os dias e cada vez mais há a necessidade de recorrer ao recurso da água para diversos fins, assim como tomar banho, cozinhar, limpar, entre outras coisas, e toda essa água após utilização é transformada em água residual (esgoto) que necessita de ser tratada.

Essas águas são encaminhadas para uma estação de tratamentos de águas residuais para que possa ser devolvida ao meio ambiente em condições seguras ambientalmente.

Os tratamentos efetuados numa ETAR dependem das características do afluente recebido e do local onde irá ocorrer a descarga final do efluente. No caso da ETAR de Paço de Sousa, são tratadas águas residuais urbanas (domésticas e industriais) com descarga no rio Sousa.

A linha líquida compreende quatro etapas de tratamento: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário.

Após a elevação inicial por parafusos de Arquimedes, é realizado o tratamento preliminar constituído por uma gradagem e por uma tamisação tipo tambor.

Após a gradagem e tamisação, o efluente sofre num único órgão um processo de desarenamento, desengorduramento e decantação lamelar, seguindo-se um tratamento secundário que consiste num sistema biológico por lamas ativadas operando em regime de média carga constituído por quatro reatores do tipo SBR (*Sequencing Batch Reactors*), que inclui 4 etapas: enchimento, arejamento, decantação e esvaziamento [3].

À saída do reator biológico, o caudal de efluente é medido através de um medidor eletromagnético de secção cheia, e irá seguir para o tratamento terciário de desinfecção por radiação ultravioleta.

O tratamento das lamas, produzidas nos processos de fase líquida, integra, para além das habituais operações de concentração de lamas, uma etapa de digestão anaeróbia com recuperação energética do biogás produzido.

No que diz respeito ao tratamento da linha gasosa, todos os órgãos e edifícios, suscetíveis de produzir odores, foram devidamente confinados e servidos por uma rede de ventilação, que conduz o ar viciado para tratamento por biofiltração [3].

Apresenta-se na Figura 2.2 um esquema geral das etapas de tratamento realizadas na ETAR de Paço de Sousa, em cada uma das linhas (líquida, sólida ou gasosa).

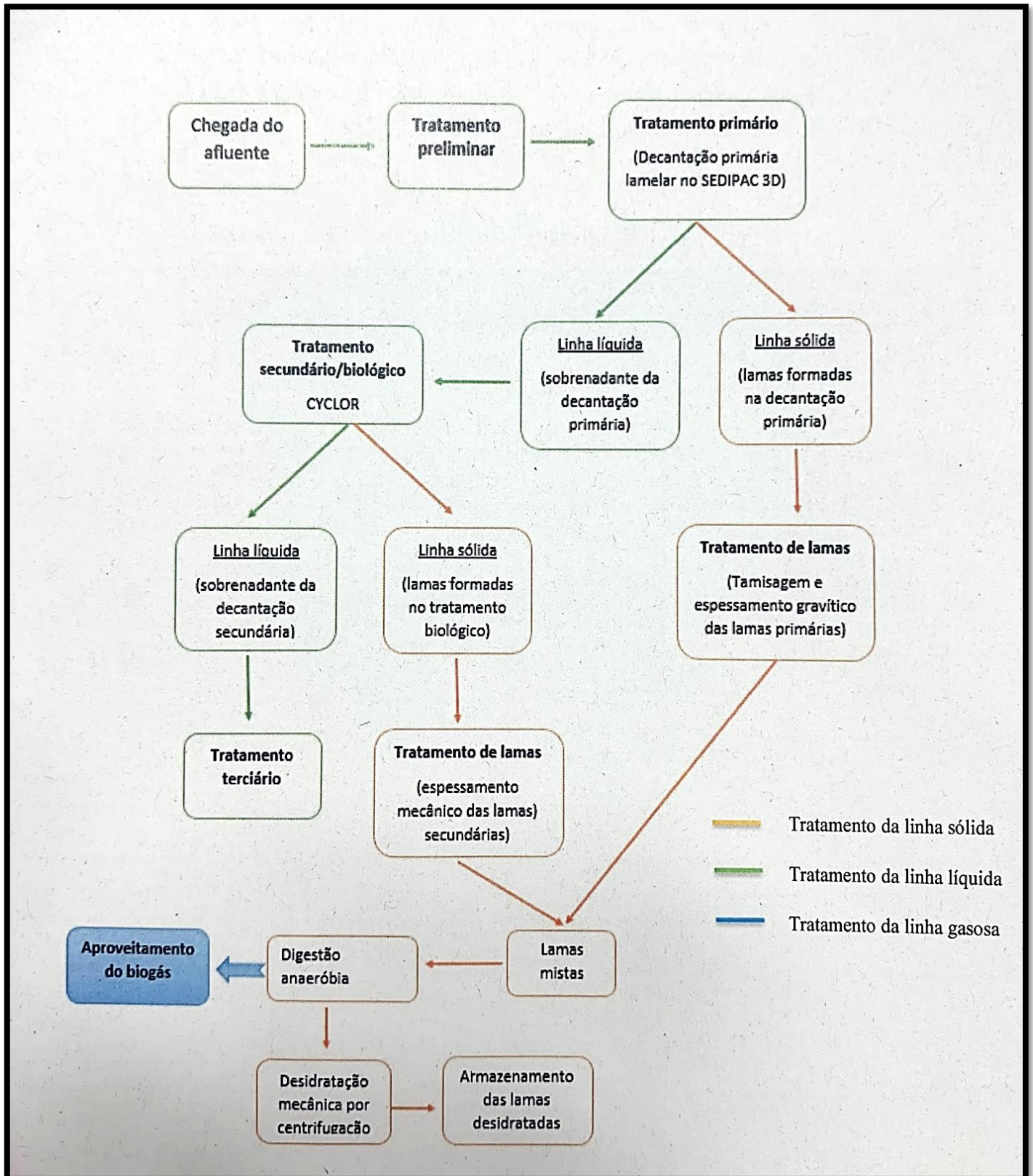


Figura 2. 2 Esquema geral das etapas de cada tratamento [4].

2.3.1 Linha líquida

2.3.1.1 Tratamento preliminar

Elevação Inicial

As águas residuais chegam a uma cota bastante baixa, sendo por isso necessária a sua elevação utilizando três parafusos de Arquimedes em dois estágios, sendo um de reserva. Esta etapa permite elevar todo o efluente até à etapa de pré-tratamento [5].

Gradagem/Tamisagem

A jusante da elevação inicial, o tratamento preliminar é constituído por uma gradagem automática e uma tamisagem tipo tambor rotativo. Este tratamento é realizado em canal em duas linhas separadas, existindo um terceiro canal equipado com uma grade manual onde os sólidos de maiores dimensões são retidos, evitando a sua passagem para as próximas etapas. Estes sólidos de maiores dimensões são encaminhados posteriormente para contentores de resíduos do processo [5].

Toda a obra de entrada foi instalada num edifício devidamente confinado e desodorizado.

As diferentes etapas que constituem o tratamento preliminar encontram-se na Figura 2.3.

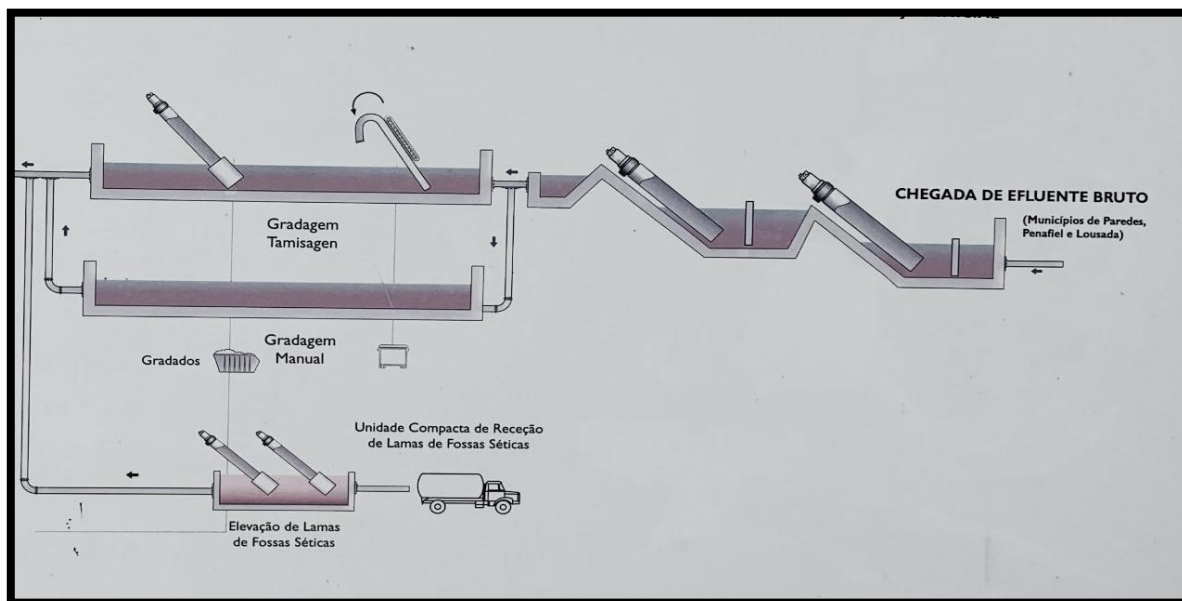


Figura 2. 3 Etapas do tratamento preliminar.

2.3.1.2 Tratamento Primário

Após a chegada das águas residuais à ETAR e posterior gradagem e tamisagem, estas são encaminhadas para o tratamento primário. Este tratamento é responsável pela decantação primária, onde as partículas sólidas em suspensão são removidas por ação da gravidade, usando lamelas que favorecem essa decantação. Para além da decantação primária, nesta etapa há também a remoção de areias, gorduras e óleos. Estes três processos ocorrem em simultâneo num único órgão compacto, o SEDIPAC 3D, sendo utilizados dois órgãos em paralelo.

Desarenamento

A separação dos processos de desarenamento e de desengorduramento permite a aplicação de velocidades mais elevadas na remoção de areias do que num órgão convencional.

Nesta zona há a criação de uma forte agitação, através de injeção de ar comprimido por difusores de bolha média, assegurando a separação das areias e da matéria orgânica que envolve as envolve.

É importante ainda referir que cada órgão está equipado com duas fossas de extração de areias, permitindo uma boa extração e encaminhando-as para o classificador de areias situado no edifício de pré-tratamento [5].

Desengorduramento

A zona de alimentação do decantador em fluxo ascendente permite a separação das gorduras por flotação. Esta operação é assegurada por difusores de ar do tipo “bolha fina”: As gorduras são espessadas durante o processo ascendente das bolhas, acumulando-se à superfície do líquido, sendo drenadas por uma caleira de superfície de acionamento automático [5].

Decantação lamelar

A separação das matérias em suspensão é efetuada numa zona equipada com uma ponte raspadora de fundo e lamelas junto à superfície.

As lamas primárias decantadas são raspadas por intermédio da ponte raspadora de fundo para uma fossa central, de onde são extraídas e encaminhadas para o espessador gravítico de lamas primárias [5].

A utilização de um decantador com lamelas é vantajoso uma vez que permite velocidades de atravessamento elevadas, comparativamente com um decantador convencional, devido à multiplicação artificial da superfície de decantação causada pelos nódulos lamelares, permitindo reduzir a área e o volume dos órgãos.

Para além disso, as lamelas são alimentadas a baixa velocidade, evitando zonas turbulentas prejudiciais à eficiência da decantação. No final da decantação, o sobrenadante segue para o tratamento secundário, enquanto que as lamas primárias seguem para espessamento gravítico.

Na Figura 2.4, encontram-se as etapas que constituem o tratamento primário.

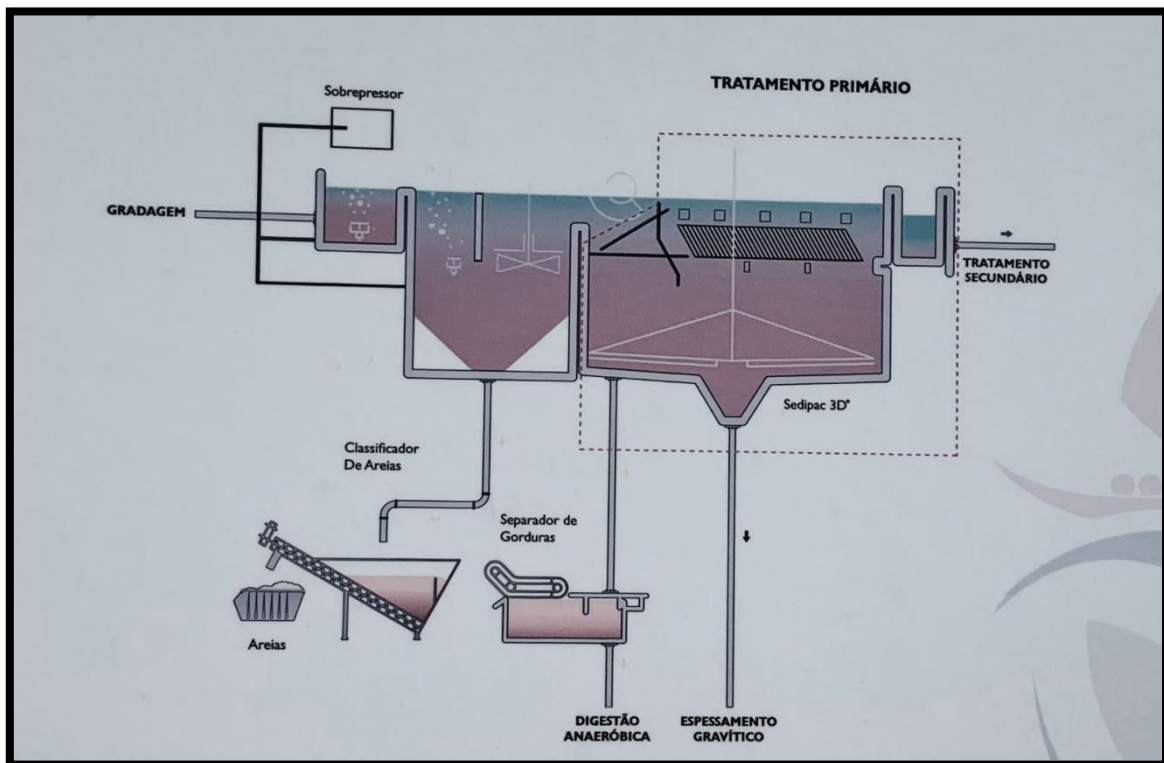


Figura 2. 4 Etapas do tratamento primário.

2.3.1.3 Tratamento secundário

Nesta etapa as águas residuais são sujeitas a um tratamento biológico aeróbio do sobrenadante proveniente da decantação primária lamelar em tanques biológicos.

O tratamento biológico é realizado segundo a tecnologia CYCLOR que apresenta como vantagens uma menor área de implantação face a um sistema tradicional de arejamento, melhor operacionalidade e melhor qualidade do efluente tratado. É também bastante flexível, estando por isso preparado para receber diferentes cargas e caudais afluentes [5].

O tratamento realiza-se segundo um sistema de lamas ativadas em quatro reatores do tipo SBR, ou seja, reatores biológicos de funcionamento sequencial, em regime de média carga, com capacidade de remoção de azoto, com arejamento por difusores de bolha fina e tomas flutuantes com braços articulados para descarga do efluente tratado [5]. Durante o tratamento secundário, no mesmo espaço físico, mas de forma sequencial e descontínua ao longo do tempo em cada sequência de tratamento ocorrem várias fases: enchimento/arejamento, decantação gravítica e esvaziamento. Após o final da sequência, o reator está em condições de dar início a uma nova sequência [5].

Na primeira fase, há a entrada gradual do sobrenadante proveniente da decantação primária lamelar. À medida que o nível de líquido vai aumentando, os agitadores/sopradores começam a funcionar proporcionando condições adequadas ao desenvolvimento da biomassa, ocorrendo a oxidação da matéria orgânica e a nitrificação do efluente [5].

Na segunda etapa, o sistema de agitação é forçado a parar, proporcionando a separação sólido/líquido. Desta forma produz-se uma zona sobrenadante de efluente clarificado [5].

Na terceira fase, a água clarificada sobrenadante é descarregada através de um sistema de recolha. As lamas secundárias são encaminhadas para o tanque de lamas secundárias para seguirem para o tratamento adequado [5].

Existe ainda uma quarta e última fase para eventuais acertos das sequências entre reatores [5].

Na Figura 2.5, encontra-se uma figura que mostra as diferentes fases do tratamento secundário.

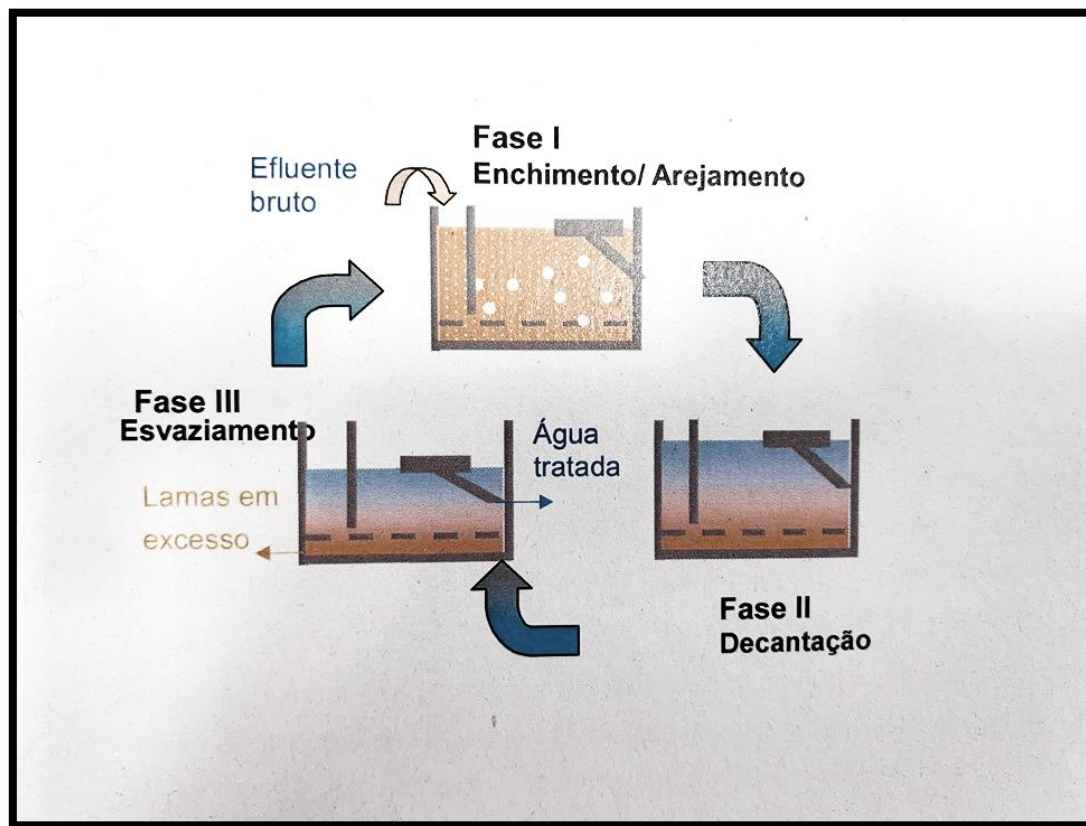


Figura 2. 5 Diferentes fases do tratamento secundário [5].

2.3.1.4 Tratamento terciário

O efluente clarificado, produto do tratamento secundário, segue para o tratamento terciário onde será submetido a uma desinfecção por UV e descarregado no meio hídrico ou reutilizado como água de serviço.

Desinfecção por radiação ultravioleta (UV)

É muito importante que o efluente seja desinfetado por radiação UV, de forma a remover microrganismos patogénicos presentes na água, antes da descarga ou antes da sua reutilização como água de serviço. Esta etapa é realizada através de lâmpadas UV,

permitindo a destruição de germes e vírus, uma vez que atua sobre o ADN e o ARN impedindo-os de se reproduzir.

Ao contrário do cloro, este processo não altera as propriedades da água, não adicionando qualquer tipo de produtos químicos [5].

Reutilização do efluente tratado após microfiltração e desinfecção com radiação UV

Esta unidade previu a reutilização de água tratada para fins compatíveis, ou seja, para rega dos espaços verdes do recinto da ETAR, limpeza de pavimentos e limpeza de equipamentos [5].

À saída do tratamento terciário, existe um depósito de armazenamento de água de serviço. Uma vez cheio o depósito, é feita a descarga para o rio.

Esta água de serviço é utilizada na ETAR para regas essencialmente, evitando-se gastos desnecessários, sendo novamente microfiltrada e desinfetada antes da sua utilização.

Na Figura 2.6, encontram-se as etapas do tratamento terciário.

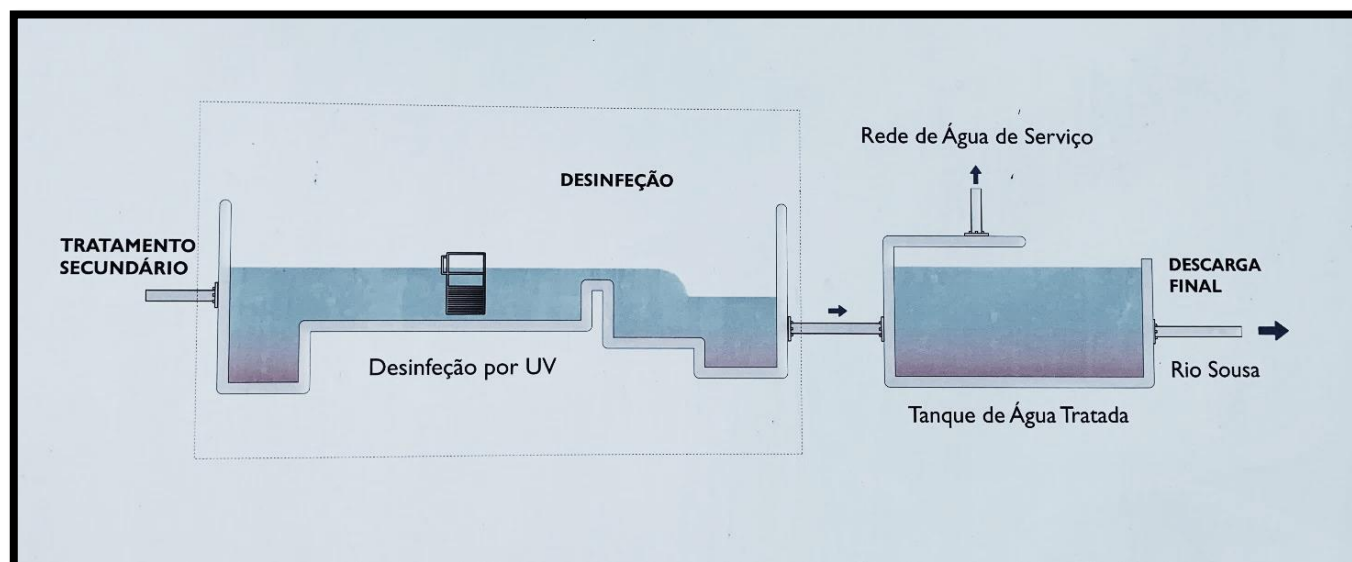


Figura 2. 6 Etapas do tratamento terciário.

2.3.2 Tratamento das Lamas/Linha sólida

O principal objetivo da ETAR é tratar as águas residuais. Contudo, nestes tratamentos são produzidos subprodutos designados por “lamas” para as quais também é necessário um tratamento para que possam ser enviadas para o destino final adequado.

2.3.2.1 Extração e espessamento de lamas

As lamas primárias, provenientes do decantador lamelar primário, são extraídas e encaminhadas para o espessador gravítico através de bombas.

As lamas biológicas em excesso, provenientes do tratamento secundário, são extraídas diretamente dos reatores biológicos por bombas até ao tanque de lamas em excesso.

Espessamento gravítico das lamas primárias

As lamas primárias são encaminhadas para o espessador gravítico, passando previamente por um tamisador, instalado no topo do espessador, com o objetivo de eliminar os aglomerados que possam existir [5], sendo depois distribuídas a partir de uma saia central. A água resultante do espessamento das lamas é recolhida e enviada pela linha de escorrências de volta ao tratamento preliminar [5].

As lamas após espessamento são encaminhadas para o tanque de lamas mistas através de bombas.

Espessamento das lamas biológicas em excesso

A montante do sistema de espessamento, existe um tanque de armazenamento das lamas em excesso de modo a homogeneizá-las antes de serem espessadas. O envio das lamas do tanque para o espessador é feito com a ajuda de uma bomba submersível [5].

Numa primeira fase as lamas são acondicionadas num floculador estático presente no espessador de modo a assegurar o tempo de contacto necessário com o polímero usado para promover a floculação. Posteriormente, as lamas floculadas são distribuídas uniformemente numa tela de poliéster montada sobre rolamentos, promovendo assim um gradual espessamento por gravidade [5].

Tal como no espessamento das lamas primárias, a água removida é enviada pela linha de escoamentos de volta ao tratamento preliminar. As lamas espessadas vão diretamente para o tanque de lamas mistas.

2.3.2.2 Armazenamento das lamas espessadas

Antes das lamas darem entrada no digestor, estas são armazenadas num tanque de modo a fornecer ao digestor uma alimentação com uma composição o mais constante possível [5].

Este tanque para além de armazenar, vai também promover a mistura das diferentes lamas que recebe, com a ajuda de 4 agitadores submersíveis, sendo denominado como tanque de lamas mistas. Este tanque recebe: lamas primárias espessadas, lamas biológicas espessadas, gorduras (provenientes do tratamento preliminar) e cloreto férrico, cuja função é promover a remoção do sulfureto de hidrogénio antes de entrar no digestor anaeróbio.

2.3.2.3 Digestão Anaeróbia de Lamas

A digestão anaeróbia é um processo de estabilização das lamas mistas produzidas no tratamento de águas residuais. Neste processo, toda a matéria orgânica das lamas é alimentada a um reator na ausência de oxigénio e com aquecimento (a uma temperatura constante) para assegurar uma boa digestão, ocorrendo a degradação das cadeias moleculares, por parte das bactérias hidrolisantes, e a decomposição dos ácidos gordos voláteis em metano e dióxido de carbono, por parte das bactérias mesófilas metanogénicas [5].

Este processo é bastante vantajoso, dado que reduz a matéria volátil na quantidade total de lamas, diminuindo assim o seu custo a destino final, produzindo um recurso renovável com muito valor energético – o biogás. [5].

O biogás produzido no digestor anaeróbio tem um potencial energético consideravelmente entre 60 a 65% de metano. Este potencial é utilizado não só para assegurar as necessidades térmicas do processo de digestão, mas também para produzir energia elétrica e térmica através do processo de co-geração [5].

A ETAR de Paço de Sousa está equipada com um digestor mesofílico com agitação mecânica e é alimentado diariamente com um caudal de lamas mistas igual ao caudal de lamas digeridas extraído do digestor.

Desta etapa, obtêm-se dois produtos: lama digerida e biogás. A lama digerida segue para o tratamento da fase sólida, sendo encaminhada para a desidratação, enquanto que o biogás é utilizado na produção de energia.

Linha de Biogás

O circuito do biogás é iniciado no digestor anaeróbio que se encontra ligado à tocha e ao gasómetro esférico de dupla membrana. Esta rede, é equipada com alguns equipamentos de segurança, inclusive uma válvula de pressão/depressão, potes de purgas de condensados e para além disso, existe ainda uma válvula de segurança que é fechada automaticamente em caso de incêndio ou presença de biogás nas salas [5].

O gasómetro utilizado, permite a estabilização do biogás. Este equipamento é do tipo insuflável de dupla membrana, ou seja, a membrana interna garante a armazenagem do biogás enquanto a externa assegura a manutenção da forma do gasómetro, servindo de proteção e cria pressão sobre a membrana interna. Este equipamento inclui também um ventilador antideflagrante, responsável por assegurar a injeção de ar entre as duas membranas e inclui ainda um medidor de nível ultrassónico no topo da membrana exterior permitindo a monitorização em contínuo da quantidade de biogás armazenada no gasómetro [5]. No caso de o gasómetro estar cheio, o excesso de biogás irá ser queimado na tocha.

É importante ainda salientar que o digestor está também ligado a uma caldeira e um grupo de co-geração, uma vez que no arranque da ETAR, dada a inexistência de biogás, houve a necessidade de consumir gás natural para aquecer o digestor [5].

Houve a necessidade de criar potes de purga nos pontos mais baixos devido à condensação da humidade presente no biogás. Estes potes de purga encontram-se numa sala específica de modo a evitar riscos no seu funcionamento, bem como a adição desnecessária de equipamentos elétricos e mecânicos anti-deflagrantes [5].

Na Figura 2.7, encontram-se esquematizados o circuito do biogás e o local de armazenamento.

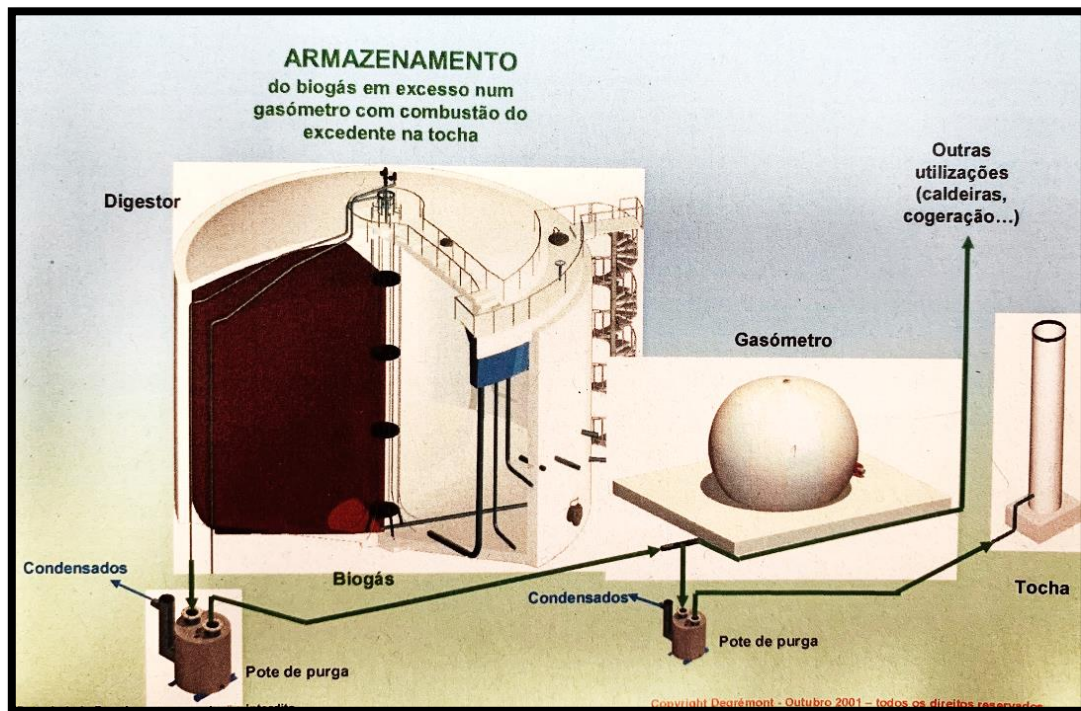


Figura 2. 7 Circuito do biogás e armazenamento [5].

Aquecimento de lamas

Para que haja uma boa digestão anaeróbia mesofílica, é importante que a temperatura se mantenha constante, operando entre os 38 e 42 °C.

O aquecimento das lamas é feito através de um circuito de água quente que atravessa um permutador de calor de placas, promovendo a transferência de calor entre duas correntes, separadas por placas. A alimentação de água quente aos permutadores é garantida com o auxílio de uma caldeira funcionando a gás natural ou biogás. O circuito de água quente funciona em circuito fechado, utilizando água descalcificada [5].

Cogeração

Nesta unidade está também incluído um sistema de cogeração, a partir do qual se produz energia elétrica e térmica. Este sistema está ligado à rede, para venda de energia [5].

A partir do gasómetro, o biogás produzido alimenta em primeiro lugar um grupo de cogeração, responsável por produzir energia elétrica e térmica, neste último caso a água de arrefecimento do motor é utilizada para aquecer as lamas do digestor. Posteriormente, o biogás alimenta ainda uma caldeira satisfazendo as necessidades térmicas do processo de digestão anaeróbia durante o re-arranque. Alternativamente, alimenta a tocha em caso de impossibilidade de utilização do biogás produzido [5].

2.3.2.4 Desidratação de lamas

Na digestão anaeróbia, parte da matéria orgânica é convertida em biogás e a restante permanece nas lamas. Este resíduo é submetido a desidratação de modo a remover a maior quantidade de água possível, de forma a evitar custos elevados de transporte deposição final.

A desidratação é realizada com o auxílio de duas centrífugas de alto rendimento. Existem duas linhas de desidratação a trabalhar em paralelo equipadas com uma bomba de alimentação, uma centrífuga, uma bomba doseadora e uma bomba de parafuso que encaminham as lamas desidratadas para os silos de lamas [5].

Inicialmente, as lamas são bombeadas por intermédio de duas bombas do tipo parafuso que extraem as lamas do digestor para a etapa da desidratação, e por fim a desidratação é feita por centrifugação. Este método apresenta vantagens em relação a outros métodos, assim como filtros de banda e filtros de prensa de placas uma vez que a necessidade de espaço e estruturas de suporte são inferiores, é maior a simplicidade de operação e manutenção, é uma solução mais limpa e minimiza a ocorrência de cheiros [5].

A zona onde ocorre a desidratação encontra-se fechada, de modo a minimizar a propagação de cheiros e limitando o teor de humidade [5].

Para que se obtenha uma boa siccidade das lamas, é necessário floculá-las antes da sua entrada na desidratação, adicionando um polímero, que é também usado no espessador de lamas em excesso [5].

Este polímero tanto pode ser em pó como em emulsão, aumentando assim a sua versatilidade, pois é possível ajustar melhor às necessidades. O doseamento deste polímero é feito através de duas bombas doseadoras de parafuso com regulação de caudal (uma para cada linha) [5].

As lamas após desidratação, são recolhidas por duas bombas parafuso (uma por linha) enviando-as para silos de armazenamento, que são posteriormente levadas para aterros [5].

A água resultante da centrifugação é enviada de volta do tratamento preliminar através da linha de escorrências.

Uma vez descrito o tratamento de lamas, á apresentado Figura 2.8 um esquema completo deste tratamento.

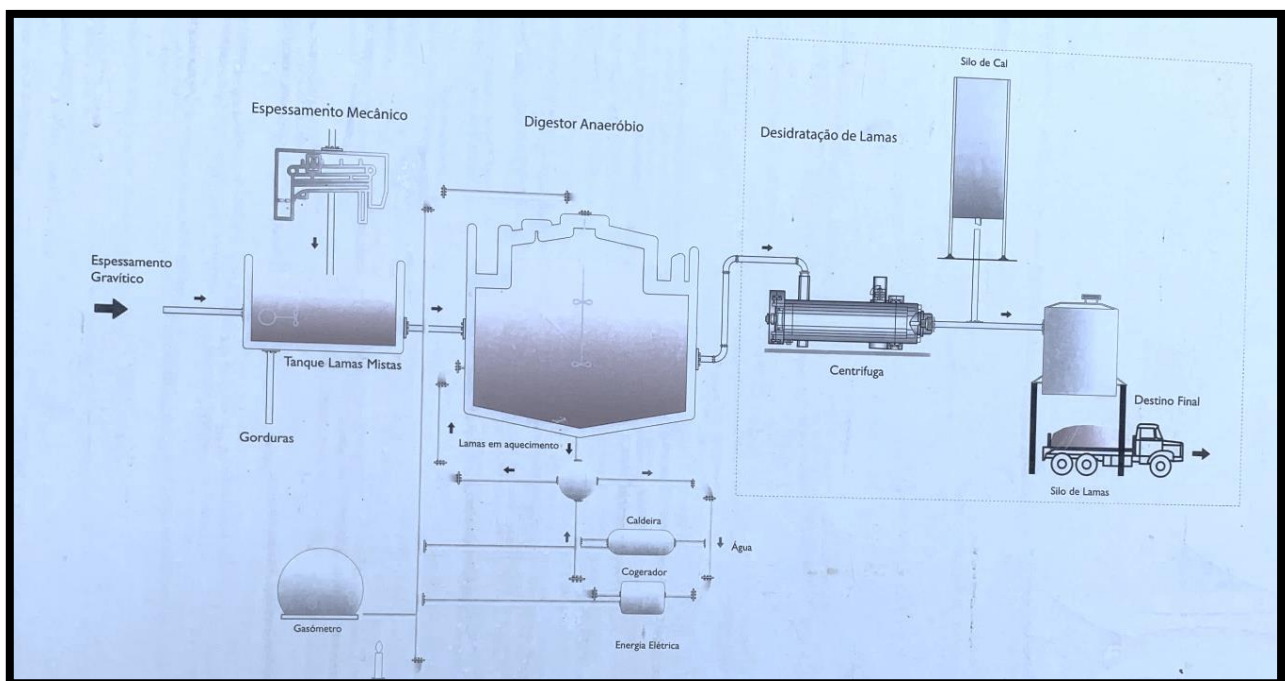


Figura 2. 8 Etapas do tratamento de lamas.

3. Conceitos teóricos sobre a digestão anaeróbia

Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos relativos ao processo de digestão anaeróbia, as etapas do processo, as vantagens e desvantagens, os parâmetros que influenciam este processo, formas de maximização da produção de biogás, e os mecanismos da digestão anaeróbia.

Tendo em conta que a digestão anaeróbia é o principal processo na ETAR no que se refere à produção de biogás, os parâmetros a serem avaliados consistem na variação de proporções de lamas primárias e secundárias à entrada do digestor anaeróbio, bem como a variação de temperatura. Contudo, antes de se proceder o caso em si, é necessário recorrer a análises laboratoriais de modo a perceber quais são os principais parâmetros a serem analisados no tratamento de lamas, uma vez que estes parâmetros são importantes para calcular os resultados esperados. Neste caso em si, as análises são realizadas às lamas primárias e secundárias [6].

As lamas primárias contêm um elevado teor de matéria orgânica biodegradável e razões de carbono/azoto (C/N) elevadas permitindo a imobilização do azoto quando aplicadas no solo [7].

Relativamente às lamas secundárias estas apresentam razões de C/N mais baixas comparativamente às lamas primárias e o azoto encontra-se quase na sua totalidade na forma orgânica, desfavorecendo a digestão destas lamas face às lamas primárias [7].

Da digestão anaeróbia resulta a produção de biogás que é recolhido e utilizado como fonte de energia, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito de estufa e para o aumento das fontes renováveis [8].

3.1 Etapas da digestão anaeróbia

Este processo pode ser dividido em duas fases. Numa primeira fase, as bactérias fermentativas são responsáveis pela conversão dos compostos complexos em compostos

mais simples, enquanto na fase seguinte há a conversão de ácidos orgânicos em produtos finais gasosos, como o biogás, composto essencialmente por metano e dióxido de carbono [9].

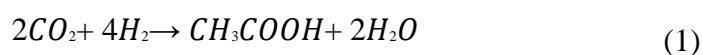
Esta última fase é realizada através de um grupo de microrganismos específicos, denominados de arqueas metanogénicas, sensíveis às variações ambientais para além de possuírem uma reduzida taxa de crescimento comparativamente a outros microrganismos. Estes fatores podem tornar o processo mais limitante uma vez que têm que cumprir com determinados requisitos para que este grupo de microrganismos não morra [9].

Estas duas etapas, no entanto, podem subdividir-se em quatro fases [10]:

Hidrólise: os compostos orgânicos complexos (lípidos, proteínas, ácidos nucleicos e polissacarídeos) não são assimilados pelas bactérias fermentativas, e por isso mesmo, são hidrolisados por enzimas hidrolases que os convertem em compostos mais simples (aminoácidos, monossacarídeos e ácidos gordos de cadeia longa), capazes de atravessar a membrana celular dos microrganismos para que possam ser convertidos. Contudo, o tempo de decomposição pode ser um fator limitante ao processo, uma vez que certas macromoléculas demoram algumas horas a converterem-se enquanto outras demoram alguns dias.

Acidogénese: Os produtos da fase anterior uma vez que já podem ser assimilados pelas bactérias fermentativas, estas tratam da sua conversão em compostos mais simples, ou seja, com cadeias curtas de ácidos orgânicos (C1-C5), tais como, o ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico, ácido valérico, álcoois, hidrogénio e dióxido de carbono.

Acetogénese: Nesta fase, um grupo de bactérias denominadas de bactérias acetogénicas, são responsáveis por utilizar os produtos da fase anterior para produzir ácido acético, dióxido de carbono e hidrogénio. Nesta fase (Reação 1), o dióxido de carbono (CO₂) reage com o hidrogénio (H₂), formando ácido acético (CH₃COOH) e água (H₂O).

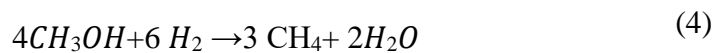


Nesta fase há a produção de hidrogénio, sendo este um produto essencial à sobrevivência das bactérias metanogénicas presentes na quarta e última fase. Contudo, as bactérias acetogénicas por terem um certo ambiente adequado à sua sobrevivência, necessitam de uma pressão parcial de hidrogénio reduzida, sendo conseguida através do

consumo deste composto na fase seguinte. Esta relação que estas bactérias possuem, mantendo uma produção e um consumo que se vão equilibrando entre si, é denominada de simbiose.

Metanogénese: Como dito anteriormente, as bactérias responsáveis por esta fase são as arqueas metanogénicas. Existem três tipos de bactérias metanogénicas, o grupo das acetoclásticas, o grupo das hidrogenotróficas e o das metilotróficas. O primeiro grupo é responsável por cerca de 60 a 70% da produção de metano, convertendo o acetato em metano e dióxido de carbono, sendo esta a via mais comum. O segundo grupo trata da produção de metano a partir do dióxido de carbono e do hidrogénio. As bactérias metilotróficas utilizam o metanol, na produção de metano.

São apresentadas, abaixo, as equações responsáveis pela produção de metano a partir das bactérias acetoclásticas (Reação 2), hidrogenotróficas (Reação 3) e metilotróficas (Reação 4).



Na Figura 3.1 encontra-se esquematizado todo o processo da digestão anaeróbia, desde os compostos orgânicos complexos até à formação de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).

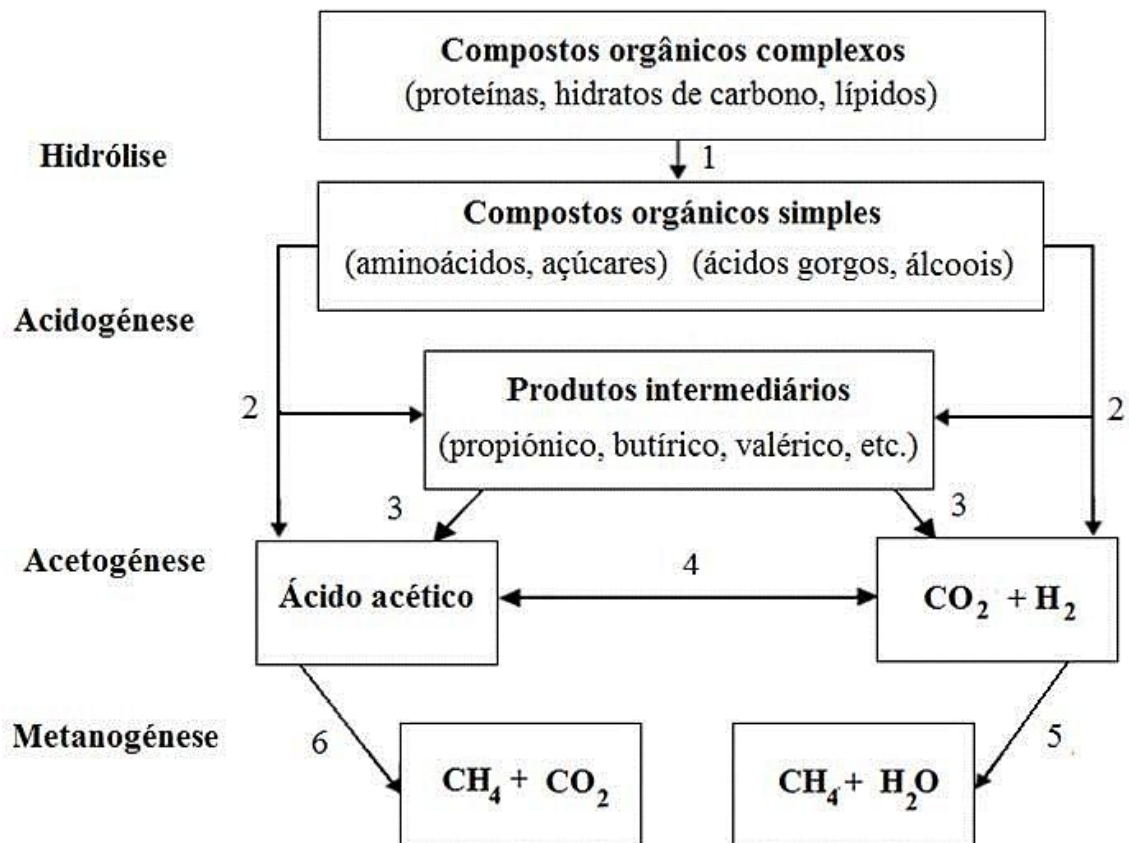


Figura 3. 1 Processo da digestão anaeróbia [6].

3.2 Vantagens e Desvantagens

Como qualquer processo, a digestão anaeróbia oferece vantagens e desvantagens ou limitações em relação a outros processos [8].

O projeto implementado potencia a neutralidade energética da ETAR de Paço de Sousa utilizando o biogás como fonte de energia. Quando emitido para a atmosfera o biogás é um gás de efeito estufa (GEE), mas ao substituir os combustíveis fósseis representa uma valiosa fonte de energia renovável, com potencial para reduzir as emissões de GEE.

Através da conversão da matéria orgânica em metano, dióxido de carbono e água, há uma redução da massa de lamas, uma vez que 30 a 65% dos sólidos das lamas são digeridos. O custo final da gestão das lamas digeridas é menor e não ocorre formação de odores desagradáveis, fazendo deste motivo uma mais valia a este processo, no entanto, o destino e o custo das lamas é atualmente um problema ambiental que o nosso país enfrenta.

As lamas digeridas melhoram a fertilidade e textura dos solos devido aos nutrientes que contêm.

Por último, outra vantagem é a elevada taxa de destruição de microrganismos patogénicos que se consegue com este processo.

Uma das primeiras desvantagens e das mais importantes, é o custo de todo o sistema, sendo que as caras são as etapas de digestão anaeróbia mesofílica e o sistema de produção de energia devido à parte elétrica que acarreta. No entanto, os digestores também acarretam custos elevados, uma vez que são de grande dimensão, fechados com sistemas de aquecimento, agitação contínua e de alimentação diária e por isso mesmo acarretam custos de instalação elevados.

O tempo é outra limitação nestes processos, uma vez que as lamas têm um tempo de retenção no digestor anaeróbio de cerca de 20 dias para se conseguir a sua estabilização.

As características do biogás resultante de um digestor anaeróbio de lamas mistas, poderá ser considerada como uma desvantagem dado o seu teor em humidade e sulfureto de hidrogénio, influenciando a sua qualidade.

Apesar de existirem tecnologias para o tratamento de biogás e a sua purificação, o custo para a sua utilização é aumentado.

Os microrganismos existentes no processo são bastante sensíveis, principalmente a variações de temperaturas, pH, AGV e NH_4 , e por isso mesmo, este processo exige o máximo acompanhamento para evitar perturbações no sistema.

3.3 Parâmetros que influenciam a digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo bastante complexo e que necessita de um controlo rigoroso principalmente das condições operacionais para garantir o seu bom funcionamento, nomeadamente ao nível da interação das comunidades microbianas fermentativas e metanogénicas, sendo esta última a mais sensível a variações no sistema. Em baixo, são apresentados os parâmetros mais importantes a ter em atenção [9]. Para otimizar o funcionamento da digestão anaeróbia, é necessário que haja um controlo global dos parâmetros influenciadores, uma vez que todos eles estão interligados [11].

3.3.1.1 Temperatura

A temperatura é dos fatores mais importantes no processo de digestão anaeróbia, uma vez que esta atua de diversas formas provocando alterações no metabolismo microbiano, na taxa de produção de biogás, na solubilidade do substrato e no equilíbrio iónico do meio [11].

A eficiência do processo depende muito do controlo da temperatura, uma pequena variação de alguns graus num curto espaço de tempo pode provocar alterações globais em toda a atividade microbiológica, como no caso das bactérias formadoras de CH_4 em que a 10 °C apresentam uma atividade muito baixa enquanto a acima dos 65 °C são destruídas pelo calor [11].

Devido a esta peculiaridade microbiana a variações de temperaturas, existem três gamas de temperatura, de acordo com a atividade dos microrganismos e a produção de gás:

- ✓ Gama Psicrófila ($< 25\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- ✓ Gama Mesófila ($25\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- ✓ Gama Termófila ($> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$).

É importante realçar que a gama ótima para o desenvolvimento das bactérias metanogénicas encontra-se entre os 35 a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, neste intervalo, as bactérias apresentam um elevado rendimento em CH_4 e por consequência uma maior produção de biogás [11].

Na gama termófila, são apresentadas taxas de metabolismo e crescimento elevadas, uma maior taxa de morte de patogénicos e uma maior velocidade das reações químicas. Comparativamente à gama mesófila, a termófila requer maior consumo de energia no aquecimento do digestor e nesta gama, os microrganismos são mais suscetíveis à presença de elementos tóxicos e a variações de condições de operação do digestor. Isto, indica que apesar da gama termófila apresentar algumas vantagens perante a gama mesófila, esta última torna-se mais estável e mais fácil de controlar, e por isso mesmo, na maioria das ETAR's os digestores são mesófilos e operam entre os 35 e os $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11].

Na Figura 3.2, é apresentado um esquema da variação das gamas existentes conforme as temperaturas e a taxa de crescimento das bactérias metanogénicas, de forma a sustentar toda a teoria mencionada.

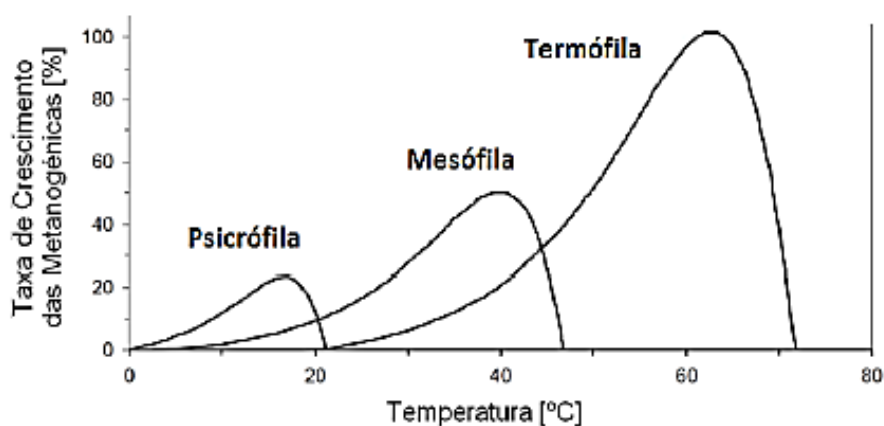


Figura 3. 2 Variação da gama de microrganismos consoante a temperatura e a taxa de crescimento das metanogénicas [11].

3.3.1.2 pH

O pH é um dos fatores a ser monitorizado na digestão anaeróbia uma vez que indica a tendência de acidificação no digestor e garante um ambiente propício ao desenvolvimento das bactérias metanogénicas. O pH ótimo na fase acetogénica varia entre 5,0 e 6,0 com uma tolerância até 4,5. Já na fase das arqueas metanogénicas os valores variam entre os 6,5 e 8. Quanto mais baixos forem os valores de pH pior será o desenvolvimento das arqueas metanogénicas, havendo a necessidade de manter o pH do sistema controlado [9].

3.3.1.3 Alcalinidade e ácidos voláteis

A alcalinidade é um fator muito importante para o tamponamento do ácido carbónico que é produzido em elevadas quantidades dentro do digestor. Este está presente na forma de bicarbonatos que estão em equilíbrio com o CO₂ [11].

O efeito tampão funciona na etapa da acidogénese. As bactérias produzem ácidos voláteis e CO₂, fazendo diminuir o pH e de modo a evitar flutuações acentuadas no pH, os bicarbonatos vão reagir com esses ácidos de modo a manter o pH próximo do neutro, rondando entre 6,5 e 8. [11].

3.3.1.4 TRH e TRS

Existem dois tipos de tempos de retenção bastante importantes na digestão anaeróbia, sendo eles o tempo de retenção de sólidos (TRS) e o tempo de retenção hidráulico (TRH).

O TRS, corresponde ao tempo médio que os sólidos estão no digestor anaeróbio e corresponde à razão entre a massa de sólidos no reator e a massa de sólidos removida diariamente, enquanto o segundo, TRH, indica o tempo médio que o líquido está no digestor anaeróbio e pode ser calculado pela razão entre o volume de líquido no reator e a quantidade de lama removida. Estes tempos são bastante importantes, uma vez que são utilizados como critério de dimensionamento para um digestor anaeróbio. No caso do TRS, este é o responsável pela seleção das espécies microbianas no sistema, pela

estabilidade e ainda pela conversão dos sólidos voláteis em produtos gasosos. Já o TRH é refletido no crescimento estável dos microrganismos metanogénicas no digestor [11].

Os tempos de retenção variam conforme o tipo de processo imposto. Nos processos mesofílicos e termofílicos, o tempo de retenção ronda os 20 dias [12]. O TRH relaciona-se com o volume e com a alimentação feita ao reator. O TRH aumenta com o aumento do volume do reator e com a diminuição da alimentação realizada ao reator, assim sendo, no caso em concreto da ETAR de Paço de Sousa, para um volume constante do reator e para uma determinada quantidade constante de alimentação diária ao reator o TRH é de cerca de 18 dias. A equação que traduz a relação entre o TRH com o volume e a alimentação é dada:

$$TRH(dia) = \frac{Volume\ digestor\ (L)}{Alimentação\ (\frac{L}{dia})} \quad (5)$$

O tempo de retenção de sólidos vai influenciar as etapas da digestão anaeróbia, ou seja, um aumento ou decréscimo neste tempo vai resultar num aumento ou decréscimo da extensão de cada uma das reações. Cada uma das reações tem um TRS mínimo, e se esse mínimo for ultrapassado, o crescimento das bactérias será lento provocando uma falha no sistema [11].

3.3.1.5 Homogeneidade

A mistura entre os microrganismos e os substratos é um parâmetro muito importante para que o processo de digestão apresente valores de produção elevados. [12].

Esta agitação deve ser controlada para que não seja lenta demais nem demasiado intensa de modo a não prejudicar os microrganismos. [12].

Este parâmetro para além de oferecer a homogeneidade em toda a mistura, contrui ainda para a equalização da temperatura em todo o reator, através do aumento mecânico dos fluxos convectivos e difusivos, tornando os processos degradativos mais rápidos,

permitindo tempos de retenção mais baixos e para além disso, no caso de reatores de fase líquida, impedindo a precipitação de materiais inertes e aglomerados no fundo, que prejudicariam a eficiência do processo [12].

3.3.1.6 Carga orgânica

A carga orgânica é o parâmetro que mede a capacidade do consórcio microbiano de converter os substratos nos produtos correspondentes e é definida pelo quociente entre o caudal mássico de sólidos biodegradáveis alimentados e o volume de reator [12].

O caudal mássico utilizado é determinado pelo caudal volumétrico da alimentação multiplicado pela concentração em sólidos biodegradáveis, expresso em SV/m^3 [12].

3.3.1.7 Nutrientes (Razão C/N)

Para que os processos biológicos sejam bem-sucedidos, torna-se imprescindível o controlo dos nutrientes no processo da digestão anaeróbia, uma vez que a concentração destes assegura o crescimento microbiano e a síntese de enzimas e cofatores indispensáveis para as reações bioquímicas e metabólicas [13].

Quanto aos nutrientes desejáveis no processo estes são: azoto, fósforo e enxofre.

Relativamente à razão Carbono/Azoto, esta determina o desempenho do processo, ou seja, o carbono constitui uma fonte de energia para os microrganismos enquanto o azoto estimula o crescimento microbiano e esta razão deve ser altamente controlada para que os valores ótimos se encontrem entre os 20 e os 30 [13].

No caso dos valores ultrapassarem os ótimos, isto indica uma deficiência em azoto, diminuindo a formação de nova biomassa, enquanto valores abaixo dos ótimos, observa-se uma produção excessiva de amónia, inibindo a biomassa metanogénica, levando à diminuição da produção de metano e à acumulação de AGV [13].

3.3.1.8 Compostos tóxicos ou inibidores

A presença de uma substância tóxica não compromete por completo o funcionamento do sistema. Depende das concentrações das substâncias e do tipo de substância [14].

Quando estas substâncias tóxicas estão presentes podem inibir as fases da digestão anaeróbia, mais propriamente a metanogénese. Dependendo da substância que seja, o comportamento das bactérias vai variar. São apresentados na Tabela 3.1, os compostos que podem afetar o processo, bem como as respetivas consequências da sua presença [10].

Tabela 3. 1 Compostos que inibem a DA e respetivas concentrações inibitórias [10].

Composto	Concentração inibidora (mg/L)	Observações
Ácido sulfídrico (H_2S)	>50	Quanto menor o pH maior o efeito inibitório.
Ácidos gordos voláteis (VFA)	>1000 ⁽¹⁾	A acumulação destes compostos no sistema reduz o pH, que inibe a atividade metanogénica.
Metais pesados	Cu > 50 Zn > 150 Cr > 100	A dissolução destes metais promove o efeito inibitório da atividade das bactérias metanogénicas.
Amónio (NH_4^+)	1500-10 000	Quanto maior o pH maior o efeito inibitório.
Oxigénio (O_2)	>0,1	Coloca em risco as bactérias metanogénicas.
Nitrato (NO_3^-)	>50	Inibe a metanogénese.

(1) equivalentes de CH_3COOH ;

3.3.1.9 Teor de sólidos

O teor de sólidos é considerando um dos parâmetros fundamentais no dimensionamento do processo de digestão anaeróbia, uma vez que este se relaciona com a otimização dos custos por redução do volume do reator e ainda com os consumos de água fresca. Consoante a percentagem de sólidos, estes podem ser divididos em três vias: húmida (6 a 10% de ST), semi-seca (10 a 20% de ST) e seca (>20% ST) [12]. No caso da via húmida, esta gera alguns problemas a nível operatórios, uma vez que suspensões muito diluídas provocam o depósito de partículas sólidas no fundo do digestor, já no caso

da via semi-seca os problemas estão associados com a eficiência da transferência de massa líquido/gás que é comprometida nas zonas mais baixas do reator. No entanto, comparativamente à via seca, pela via húmida obtêm-se maiores taxas de metanogénese devido ao elevado fluxo de transferência de ácidos produzidos durante as fases da acidogénese e acetogénese, responsáveis pelas elevadas eficiências de remoção de sólidos e altas produções específicas de metano [12].

3.3.1.10 Potencial Redox

O potencial redox é um indicador que avalia a capacidade do meio, ou seja, a capacidade de cada molécula receber ou doar eletrões, sendo afetado por alterações de equilíbrio iónico. Este parâmetro deve ser analisado regularmente para verificar a existência de materiais oxidantes que possam afetar a eficiência do sistema, sendo o indicador com a resposta mais rápida para o controlo do comportamento do processo [11]. [11]. Na Tabela 3.2, são apresentados os valores do potencial redox consoante o tipo de respiração.

Tabela 3. 2 Potencial redox para os diferentes tipos de respiração [11].

Tipo de respiração	Molécula final da cadeia de eletrões	Eh [mV]
Aeróbia ou oxida	O ₂	>50
Anaeróbia ou anóxica	NO ₃ ⁻	
Anaeróbia ou redução-sulfato	SO ₄ ²⁻	<-400
Anaeróbia ou fermentação de ácido e álcoois	CH ₂ O	<-100
Anaeróbia ou produção de metano	CO ₂ (carbonato*)	<-300

É importante que este parâmetro se encontre com valores da ordem dos -260 mV, a pH de 7. Mudanças bruscas deste parâmetro, influenciam a acumulação de ácidos e a variação de pH.

3.4 Produtos da Digestão Anaeróbia

Do processo de digestão anaeróbia, resultam essencialmente dois produtos: o biogás e as lamas digeridas.

As lamas digeridas, são ricas em nutrientes tais como o fósforo e o azoto, sendo, portanto, um bom fertilizante para a agricultura. No entanto, este resíduo apresenta agentes patogénicos, que podem afetar a agricultura. Considerando que o processo de digestão anaeróbia é realizado na gama termófila, a probabilidade de apresentar agentes patogénicos é reduzida, no entanto, quando o processo é realizado na gama mesófila, o resíduo digerido deve ser submetido a um tratamento térmico, de modo a eliminar os agentes patogénicos [11] tendo em vista a sua aplicação como fertilizante em solos agrícolas, segundo DL 276/2009 que regulamenta a aplicação de lamas de ETAR em solos agrícolas.

O biogás é o produto que apresenta maior potencial de valorização via energética devido às suas características combustíveis, aumentando assim o interesse económico no processo da digestão anaeróbia. Este gás é incolor, geralmente inodoro, não tóxico, de baixa densidade e com valores de poder calorífico inferior entre 4831,14 e 6253,01 kcal/kg sendo constituído por uma mistura de diferentes gases, metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), são os predominantes na sua constituição, seguidos do azoto (N_2), hidrogénio (H_2) e sulfureto de hidrogénio (H_2S) [11].

Para a determinação da produção de gás admite-se que, em condições de funcionamento do processo, se geram 0,75 a 1 m^3 por kg de sólidos voláteis destruídos, assumiu-se 0,90 neste trabalho, uma vez que é o valor intermédio e o utilizado na ETAR de Paço de Sousa [15].

O metano puro em condições normais de pressão e temperatura (1 atm e 0 °C), apresenta um poder calorífico inferior (PCI) de 11940,0 kcal/kg, permitindo que o biogás seja utilizado como combustível gasoso para a produção de energia elétrica, térmica e mecânica [11].

O biogás pode ser reaproveitado, utilizando-se um motor de cogeração que, através da queima do biogás, permite fornecer calor ao processo de digestão anaeróbia, mantendo a temperatura do digester constante e fornecendo energia elétrica à instalação ou vendendo-a à rede de distribuição elétrica, diminuindo assim os seus custos energéticos [11].

3.5 Mecanismos da digestão anaeróbia

No diagrama esquemático, apresentado na Figura 3.3, encontra-se a conversão de sólidos voláteis em produtos estáveis e gases. Este diagrama tem como base 100 kg de sólidos totais presentes em lamas mistas, destes 100 kg, 70% são sólidos voláteis e 30% sólidos fixos. É de referir que nem todos os sólidos voláteis presentes nas lamas são degradáveis biologicamente [16].

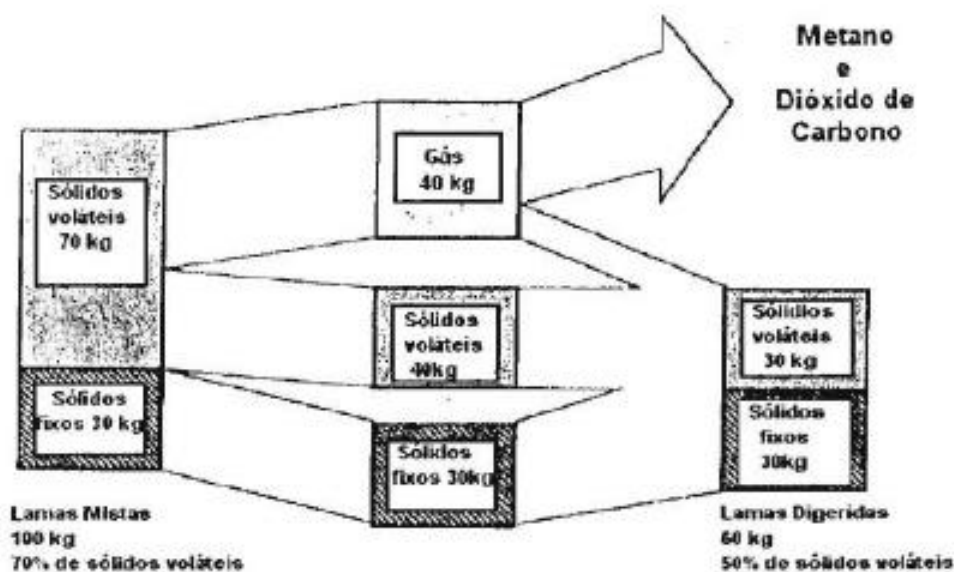


Figura 3. 3 Diagrama esquemático da conversão de sólidos voláteis em gases e lamas digeridas [17].

Aproximadamente 30 a 40% da massa volátil das lamas afluentes permanecerá por digerir. Através da análise à Figura 3.3, dos 70 kg de sólidos voláteis, 40 kg permanecem por digerir, enquanto que 30 kg saem sob a forma de gás, no entanto, dessa matéria ainda por digerir 10 kg são biogás, daí perfazer os 40 kg presentes na figura, de forma a equilibrar o balanço de massa. No final do balanço, as lamas digeridas são constituídas por cerca de 50% de sólidos voláteis e 50% de sólidos fixos, ou seja, 60kg [16].

O balanço de massa é feito em base seca, ou seja, o conteúdo em água não é considerado tanto nas lamas mistas como nas digeridas, focando-se apenas nas transformações na fase sólida [15]. Dos 70 kg de sólidos voláteis, 40 kg são convertidos em biogás enquanto que 30 kg permanecem sob a forma de sólidos voláteis. Transpondo isso para percentagem, a conversão de biogás é de cerca de 57% e no caso dos sólidos voláteis de 43%.

4. Descrição experimental

No capítulo 4, é descrita a metodologia experimental utilizada neste trabalho, nomeadamente a montagem, da instalação piloto.

Na ETAR, de Paço de Sousa são realizadas análises laboratoriais diariamente quer à fase líquida, quer às lamas, ao longo do respetivo processo de tratamento.

Uma vez que este estudo incide maioritariamente no tratamento de lamas, mais propriamente na digestão anaeróbia, são descritos os procedimentos Utilizados na caracterização da lama antes da entrada no digestor (lama mista) e à saída (lama digerida). Nos estudos realizados à escala piloto foram feitas análises antes e depois de cada ensaio.

4.1 Caracterização das lamas

pH e Temperatura

O pH é medido num medidor de pH, previamente calibrado, onde esse medidor fornece o valor de pH e da temperatura de uma determinada amostra, no entanto, à saída do digestor a temperatura é medida diretamente de forma a controlar variações que possam existir dentro do digestor. Para todo o tipo de lamas e para a fase líquida existem valores impostos de pH que devem ser obedecidos, de uma forma geral, eles variam entre 6,5 e 8. No caso do digestor, o pH varia entre 7,2 e 7,5 e a temperatura deve variar entre 35-42 °C.

Sólidos Totais (ST)

Os sólidos totais (ST) indicam a matéria orgânica e mineral presente em cada amostra. Para a determinação deste parâmetro é necessário preparar previamente todos cadinhos que vão ser usados na determinação numa mufla a 550 °C durante 15 min, e posteriormente são mantidos no exsiccador durante 30 min e são pesados ainda vazios

(m_a). Após esta etapa inicial, é adicionado um determinado volume medido rigorosamente (V_b) de cada amostra (aproximadamente 30 ml) para cada cadinho, sendo levados à estufa a 105 °C onde permanecem durante 1 noite.

No dia seguinte, são retirados os cadinhos, deixados num exsiccador durante 30 min e por fim pesados (m_c). O teor de ST é calculado de acordo com a equação 6.

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_c(g) - m_a(g)) \times 10^6}{V_b (mL)} \quad (6)$$

Os valores devem ser menores que 40000 mg/L, de acordo com os valores de referência do laboratório.

Sólidos Voláteis (SV)

Para a determinação dos sólidos voláteis, segue-se o mesmo procedimento que é descrito para os ST, no entanto, após os cadinhos saírem da estufa, serem arrefecidos num exsiccador e por fim pesados, eles seguem de novo para a mufla a 550 °C durante 1 h, e após esta última fase são levados novamente ao exsiccador durante 30 min para arrefecer e são novamente pesados (m_d). O cálculo para o teor de SV é dado pela equação 7.

$$SV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_d(g) - m_a(g)) \times 10^6}{V_b (mL)} \quad (7)$$

Os valores obtidos devem ser menores que 23000 mg/L, de acordo com os valores de referência do laboratório.

Alcalinidade (ALC)

Para a determinação deste parâmetro, inicialmente medem-se rigorosamente 25 mL de lama para o tubo da centrífuga e centrifuga-se essa lama, a 5000 rpm. durante 20 minutos. Após a centrifugação, é recolhido o líquido sobrenadante num gobelé de 250

mL e adiciona-se 50 mL de água destilada à lama centrifugada. Esta lama é novamente centrifugada a 5000 rpm durante 20 minutos e recolhe-se novamente o sobrenadante.

O líquido recolhido no gobelé contém entre outros, os bicarbonatos e os ácidos voláteis solúveis. Para a determinação da alcalinidade, coloca-se o sobrenadante em agitação num agitador magnético, medindo e registando o pH do líquido.

Titulou-se com H_2SO_4 padronizado a 0,1 N até atingir pH = 4. Registou-se o volume gasto ($V_{1(ml)}$) e continuou-se a titular até pH = 3,5.

O cálculo para a determinação da alcalinidade é dado pela equação 8.

$$Alcalinidade \left(\frac{mg \text{ } CaCO_3}{L} \right) = V_1 (mL) \times 4 \times 0,05 \times 1000 \quad (8)$$

Os valores devem encontrar-se entre 4000 e 6000 mg/L, de acordo com os valores de referência do laboratório.

Ácidos gordos voláteis (AGV)

Para a determinação dos AGV, ferveu-se o sobrenadante a pH=3,5 (solução proveniente da determinação da Alcalinidade) durante 3 minutos. Deixou-se arrefecer à temperatura ambiente e colocou-se o sobrenadante em agitação num agitador mecânico.

Titulou-se com NaOH 0,1 N padronizado até atingir pH=4. Registou-se o volume gasto, V_2 (mL), e continuou-se a titular até pH=7, voltando a registar o novo volume gasto, V_3 (mL).

O cálculo para a determinação da alcalinidade é dado pela equação 9.

$$AGV \left(mg \frac{CH_3COOH}{L} \right) = (V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06 \times 1000 \quad (9)$$

Os valores obtidos devem ser menores que 500 mg_{CH_3COOH}/L

4.2 Descrição do funcionamento do Digestor anaeróbio da ETAR de Paço de Sousa

A ETAR de Paço de Sousa na sua estrutura tem apenas um digestor anaeróbio mesófilo, ou seja, onde as temperaturas permitidas encontram-se compreendidas na gama mesofílica.

O digestor presente nesta instalação é de uma só etapa. As funções de digestão, espessamento e formação de sobrenadante são executadas num só órgão e apresentado na Figura 4.1.

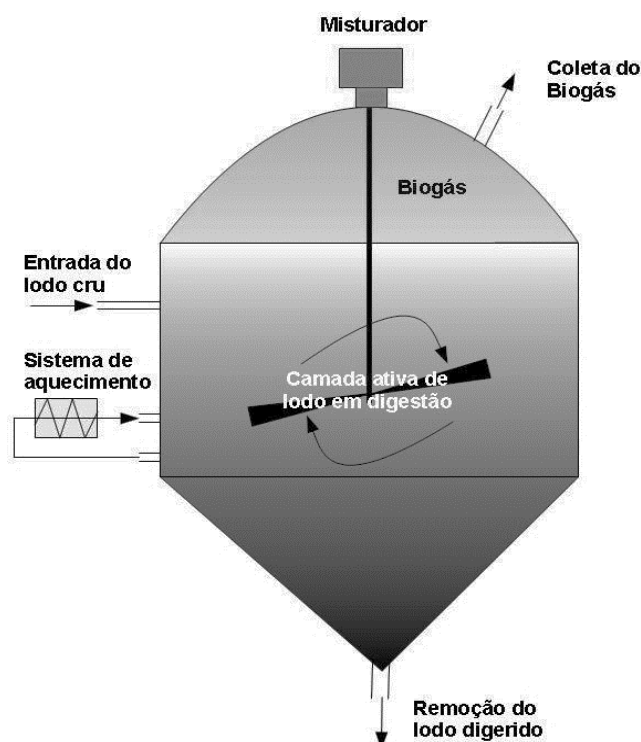


Figura 4. 1 Estratificação de um digestor anaeróbio [17].

As lamas mistas são adicionadas na zona de digestão ativa, onde o biogás é libertado. As lamas mistas juntamente com as lamas recirculadas são aquecidas através de um permutador externo [15].

A Figura 4.1, mostra a estratificação do digestor implemento e a forma como é feito o movimento do gás e das lamas [15].

O volume total é de 1800 L, sendo constituído por um sistema de recirculação, em que diariamente são extraídos 100 L de lamas e simultaneamente são alimentados 100 L de lamas mistas. Estas lamas mistas são constituídas por lamas primárias e secundárias numa proporção variável de dia para dia, no entanto, prevalecendo em maior quantidade as lamas primárias.

Relativamente ao tempo de retenção hidráulico, este é de 18 dias.

Quanto à temperatura, o digestor opera a 41,5 °C, o que permite obter uma boa produção de biogás, e com elevada percentagem de metano.

4.3 Instalação piloto

4.3.1 Descrição da instalação

Com o objetivo de otimizar o funcionamento do digestor anaeróbio, no que se refere à quantidade e qualidade do biogás produzido, foi montada uma instalação piloto que simulasse o funcionamento do digestor real, de forma a poder estudar a influência dos parâmetros temperatura (dentro da gama mesófila, compreendida entre 38 e 42 °C) e composição da alimentação (proporção lamas primárias (LP) e lamas secundárias (LS) à entrada do digestor).

Para tal, foram montados 10 reatores (permitindo estudar 5 condições operatórias diferentes, em duplicado), sendo o inóculo constituído por lamas digeridas do digestor da ETAR de Paço de Sousa, em iguais quantidades nos diferentes reatores. Quanto ao substrato, este será constituído por lamas primárias e lamas secundárias, com diferentes proporções nos 5 reatores.

No estudo do efeito das composições do substrato foram usadas as seguintes condições: reator 1 e 2 contendo 100% de lamas primárias; os reatores 3 e 4 com 100% de lamas secundárias; os reatores 5 e 6, com 50% de lamas primárias e 50% de lamas secundárias; os reatores 7 e 8 com 60% de lamas primárias e 40% de lamas secundárias; e os reatores 7 e 8, com 60% de lamas secundárias e 40% de lamas primárias.

De forma agora a avaliar o efeito da temperatura nos diferentes reatores, foram realizados 3 ensaios fazendo manter estas composições nos 10 reatores, apenas variando as temperaturas, sendo o primeiro ensaio realizado a 38 °C, o segundo a 40 °C e o terceiro a 42 °C. A temperatura do banho foi medida diariamente, cerca de 3 vezes por dia.

O funcionamento desta instalação piloto difere da real na ETAR, uma vez que não contempla a recirculação de lamas, ou seja, são reatores fechados sem alimentação, por isso, o tempo de retenção, a produção de gás, a qualidade do biogás, entre outras vertentes, não serão de todo proporcionais ao reator real. Para além disso, na instalação piloto não existe agitação contínua, esta era feita manualmente 3 vezes por dia, o que poderá interferir nos resultados obtidos devido à falta de contacto entre inóculo e substrato, fazendo reduzir a produção de biogás.

Os reatores utilizados na instalação piloto têm um volume máximo de 1,5 L, no entanto o volume utilizado foi de 1 L. Cada ensaio foi considerado terminado quando se deixava de produzir biogás.

A imagem da instalação piloto encontra-se na Figura 4.2.



Figura 4. 2 Instalação piloto.

Nestes ensaios foi medido o potencial bioquímico de produção de metano (BMP) do inglês *Biochemical Methane Potencial*, que avalia a atividade metanogénica, acidogénica e de hidrólise do inóculo utilizado. O BMP corresponde à quantidade máxima de metano produzida durante um ensaio num reator fechado, utilizando um inóculo apropriado, que contenha todos os grupos tróficos relevantes para a degradação do resíduo em causa, em condições de temperatura adequada e na presença dos macro e micronutrientes necessários [18]. O teste baseia-se na monitorização do metano produzido em garrafas fechadas em condições adequadas ao ótimo funcionamento da comunidade microbiana usada como inóculo. A produção de metano pode ser medida por métodos volumétricos ou manométricos [18]. Neste trabalho foi usado o método volumétrico, em que se mediu o volume de água deslocado pelo biogás produzido.

A realização de ensaios desta natureza é essencial para aferir o potencial metanogénico de um resíduo/produto/subproduto orgânico e simultaneamente detetar possível inibição ou toxicidade associado ao resíduo em causa.

A determinação do BMP de um resíduo orgânico é precedida de um conjunto de análises para a sua caracterização:

- ✓ Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis totais (SV)
- ✓ Carência química de oxigénio (CQO)

Relativamente aos testes de BMP, estes baseiam-se na medição do volume de metano acumulado em frascos selados quando se incuba, em condições anaeróbias, o inóculo com substratos/resíduos a testar. O inóculo deve ser fresco, apresentar boa atividade metanogénica e possuir uma comunidade microbiana diversa. O volume de inóculo pode variar entre 10% a 90% do volume de trabalho, dependendo da sua atividade e concentração. A duração do teste está dependente da capacidade do inóculo em degradar o substrato em biogás. Quanto maior a concentração do inóculo, mais rápida será a conversão biológica e, consequentemente, o ensaio terá terminado mais rapidamente. Os ensaios são realizados em frascos fechados (de 25 mL até 3 L) em função da homogeneidade do substrato, ou seja, um substrato mais homogéneo necessitará de um frasco de menor volume. Relativamente aos ensaios, eles devem ser realizados pelo menos em duplicado [19].

4.3.2 Funcionamento da instalação

A montagem e desenvolvimento desta instalação foi baseada na que foi utilizada num estudo realizado em 2016, onde o objetivo foi avaliar o potencial bioenergético dos excrementos de animais de estimação [20].

A instalação era composta por 5 reatores (garrafas de 1,5 L), em duplicado, (10 reatores no total), conectados a 10 garrafões de 6 L previamente graduados e cheios com 5,5 L de água.

Na ligação entre o reator e o garrafão, existe uma ligação para o exterior que serve para receber o analisar de biogás, devidamente fechada com uma válvula (mola de cozinha). Entre o reator e o garrafão, há ainda o uso de uma válvula, pois no caso de ser necessário voltar a encher o garrafão, é necessário fechar esta válvula para que não haja entrada de oxigénio no reator.

Nos garrafões existe ainda uma ligação extra, submersa na água, para permitir o movimento da água do interior do garrafão para o exterior. É de reforçar que estas conexões têm que estar devidamente isoladas para evitar quaisquer fugas de gás.

Esta instalação está imersa num banho equipado com uma resistência aquecimento acoplada a um regulador da temperatura.

A agitação de cada reator foi feita manualmente, para promover o contacto entre o inóculo e o substrato. À medida que o gás é produzido, vai ocupando o espaço livre dentro de cada reator e quando já não há mais espaços vazios é enviado para o garrafão. Com o passar do tempo, o gás vai-se acumulando no garrafão, fazendo mover a água do garrafão através da ligação para o exterior que cada garrafão possui.

Cerca de três vezes por dia, exceto fins de semana e feriados, e sempre às mesmas horas, eram lidos os volumes de água de cada garrafão antes e depois da agitação ainda era medida a temperatura ambiente e a do banho para avaliar variações de temperatura.

Para a determinação da produção de biogás, através dos volumes de água medidos, à quantidade total de cada garrafão eram retirados aos volumes de água lidos diariamente, sendo que essa diferença será a quantidade de biogás produzida diariamente e presente dentro do garrafão. Ao longo do tempo, o volume de água dentro do garrafão ia diminuindo enquanto que a produção de biogás ia aumentando, e depois passa a diminuir,

até chegar a uma determinada altura em que não havia movimento de água para o exterior indicando que já não havia mais produção de biogás e que o ensaio teria terminado.

Para cada ensaio realizado nesta instalação, eram retiradas amostras do conteúdo inicial e final de cada reator para posterior caracterização. No final eram repostos novos reatores, e água em cada garrafão, para dar início a um novo ensaio a uma temperatura diferente. Optou-se por utilizar o mesmo intervalo de tempo para todos os ensaios, para permitir uma comparação mais direta dos resultados, ou seja, ao fim de 22 dias os ensaios consideravam-se terminados, o que era confirmado pelo fim da produção de biogás.

Os problemas encontrados na instalação piloto incidiram principalmente em fugas de gás e deficiências na agitação, uma vez que esta era feita manualmente apenas três vezes por dia, o que reduzia o contacto entre substrato e inóculo.

A necessidade de montar reatores em duplicado serviu para ajudar na comparação de resultados e para o caso de algum apresentar problemas, salvaguardar os resultados através do ensaio duplicado. No caso de nenhum ter apresentado problemas, os resultados considerados foram a média dos dois ensaios.

Quanto aos três ensaios propostos, estes variaram apenas na temperatura, sendo o primeiro realizado a 38 °C, o segundo a 40 °C e o terceiro a 42 °C.

Foram realizados quatro ensaios, sendo que o primeiro serviu apenas como um teste preliminar, uma vez que as quantidades utilizadas de inóculo e substrato não foram as mais indicadas. O ponto fulcral deste estudo consistiu em encontrar a quantidade certa de inóculo e de substrato a utilizar nos 10 reatores.

No anexo A, encontram-se os cálculos necessários para determinar as quantidades ideais de inóculo e substrato a utilizar de forma a obter resultados satisfatórios.

5. Resultados e Discussão

Uma vez que o ensaio 1 foi desprezado por se tratar de um ensaio preliminar, que serviu principalmente para testar o funcionamento da instalação piloto, são apresentados, neste capítulo apenas os resultados laboratoriais dos ensaios 2,3 e 4.

No que toca ao ensaio 2, este foi realizado à temperatura de 38 °C e teve a duração de 22 dias, tendo início no dia 23 de abril de 2019 e finalizando a 15 de maio de 2019. O ensaio 3 foi realizado a 40 °C, teve início a 21 de maio e terminou a 13 de junho. Por fim, o ensaio 4 foi realizado a 42 °C, iniciou-se a 25 de junho e terminou a 17 de julho. Os resultados das análises laboratoriais realizadas no início de final de cada ensaio encontram-se nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, respetivamente.

Tabela 5. 1 Resultados laboratoriais do ensaio 2.

Ensaio 2 - 38 °C								
DATA	Amostra	Temperatura (°C)	pH		ST (mg/L)	SV (mg/L)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
23/abr	100% LP (R1)	23	7,04	7,07	31033	24110	624	1840
	100% LP (R2)	23	7,07	7,04	31477	24440	648	1800
	100% LS (R3)	23	7,64	7,65	15140	11283	120	1660
	100% LS (R4)	23	7,69	7,69	13993	10367	192	1660
	50%/50% (R5)	23	7,33	7,33	23037	17707	432	1700
	50%/50% (R6)	23	7,38	7,38	23330	17897	384	1700
	60%LP (R7)	23	7,27	7,27	26290	20283	504	1780
	60%LP (R8)	23	7,34	7,34	25797	19837	480	1820
	40%LP (R9)	23	7,35	7,35	22117	16850	408	1840
	40%LP (R10)	23	7,36	7,37	22020	16767	384	1820
15/mai	100% LP (R1)	38,4	7,54	7,54	19813	13163	624	3920
	100% LP (R2)	38,4	7,52	7,52	21543	14260	804	3880
	100% LS (R3)	37,9	7,48	7,49	12543	8623	192	2480
	100% LS (R4)	38,2	7,44	7,44	12207	8363	288	2580
	50%/50% (R5)	38,1	7,44	7,44	15493	10313	312	3380
	50%/50% (R6)	38,3	7,41	7,41	16447	10923	336	3440
	60%LP (R7)	38,7	7,41	7,41	17430	11567	336	3540
	60%LP (R8)	38,1	7,40	7,40	17460	11580	360	3460
	40%LP (R9)	37,9	7,39	7,39	15240	10183	408	3100
	40%LP (R10)	37,8	7,43	7,43	15290	10100	312	3300

Tabela 5. 2 Resultados laboratoriais do ensaio 3.

Ensaio 3 - 40 °C								
DATA	Amostra	Temperatura (°C)	pH		ST (mg/L)	SV (mg/L)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
21/mai	100% LP (R1)	23	6,86	6,87	23747	18503	864	1980
	100% LP (R2)	23	6,85	6,86	22870	17770	912	2000
	100% LS (R3)	23	7,48	7,49	11957	8497	192	1780
	100% LS (R4)	23	7,51	7,52	12123	8600	168	1800
	50%/50% (R5)	23	7,00	7,00	20360	15227	480	1888
	50%/50% (R6)	23	7,06	7,07	20787	15587	408	1860
	60%LP (R7)	23	6,92	6,92	22110	16647	432	1720
	60%LP (R8)	23	6,96	6,96	22827	17260	480	1840
	40%LP (R9)	23	7,06	7,05	20120	15103	408	1820
	40%LP (R10)	23	7,10	7,11	20120	15090	366	1800
13/jun	100% LP (R1)	39,8	7,55	7,52	15113	10060	384	3400
	100% LP (R2)	39,7	7,42	7,42	15200	10117	384	3480
	100% LS (R3)	39,9	7,42	7,43	10330	6867	168	2300
	100% LS (R4)	39,2	7,57	7,56	10263	6760	192	2220
	50%/50% (R5)	39,7	7,41	7,41	15240	10057	192	3060
	50%/50% (R6)	39,3	7,42	7,42	15377	10187	240	2920
	60%LP (R7)	39,3	7,45	7,44	16643	10940	240	3100
	60%LP (R8)	39,2	7,45	7,45	16753	11033	264	3020
	40%LP (R9)	39	7,36	7,35	15687	10430	216	2800
	40%LP (R10)	39	7,38	7,37	15317	10147	192	2860

Tabela 5. 3 Resultados laboratoriais do ensaio 4.

Ensaio 4 - 42 °C								
DATA	Amostra	Temperatura (°C)	pH		ST (mg/L)	SV (mg/L)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)
25/jun	100% LP (R1)	26,1	7,22	7,24	22617	17247	408	1740
	100% LP (R2)	26,1	7,16	7,16	22207	16957	456	1720
	100% LS (R3)	26,1	7,50	7,50	12850	9750	192	1580
	100% LS (R4)	26,1	7,48	7,48	13343	9943	192	1480
	50%/50% (R5)	26,1	7,28	7,28	17540	13247	288	1640
	50%/50% (R6)	26,1	7,26	7,26	18100	13733	288	1680
	60%LP (R7)	26,1	7,17	7,17	19690	15010	456	1580
	60%LP (R8)	26,1	7,15	7,16	19693	14990	360	1620
	40%LP (R9)	26,1	7,29	7,29	17077	12797	288	1580
	40%LP (R10)	26,1	7,32	7,34	16757	12620	240	1680
17/jul	100% LP (R1)	41,9	7,88	7,86	16420	11107	228	2940
	100% LP (R2)	41,9	7,73	7,73	16253	10960	120	3010
	100% LS (R3)	41,7	7,63	7,63	10633	7277	144	2110
	100% LS (R4)	41,5	7,74	7,75	10593	7220	120	2620
	50%/50% (R5)	41,6	7,54	7,55	13657	9220	96	2200
	50%/50% (R6)	41,8	7,67	7,68	13437	9047	96	2680
	60%LP (R7)	41,8	7,71	7,72	13997	9407	108	2670
	60%LP (R8)	41,6	7,63	7,63	14197	9607	96	2730
	40%LP (R9)	41,4	7,6	7,6	13100	8873	120	2600
	40%LP (R10)	41,3	7,5	7,51	13200	8890	192	2350

Através da análise feita às Tabelas 5.1 a 5.3 é possível concluir que os resultados são concordantes com os seus duplicados e que se encontram dentro dos valores da literatura, presentes na secção 4.1.

Relativamente ao pH, o valor deste parâmetro diminui conforme o aumento da percentagem de lamas primárias dentro do reator, devido às características desta lama, no entanto, os valores são muito próximos, e encontram-se compreendidos na gama pretendida, entre 6,5 e 8.

Dentro de cada reator, ao longo dos 22/23 dias, há formação de ácidos gordos voláteis, que reagem com as bases presentes, quantificadas através do parâmetro alcalinidade, permitindo desta forma que o pH se mantenha no intervalo pretendido (entre 6,5 e 8), verificando -se um decréscimo da concentração de AGV.

Quanto aos ST e SV, há um decréscimo entre o início e o fim de cada ensaio, o que mostra que houve a conversão de sólidos voláteis em biogás. Esta taxa de conversão dos sólidos voláteis em biogás permite calcular a quantidade de biogás que se espera obter nos ensaios, esse cálculo é apresentado no Anexo B.

5.1 Resultados esperados

Tendo em conta que o objetivo deste trabalho consiste na maximização da produção de biogás, e uma vez que neste tipo de estudos há muitos problemas, desde fugas, entupimentos e o facto de não haver agitação contínua, foi fundamental o cálculo dos resultados esperados para que se pudesse avaliar e comparar com os resultados obtidos.

Para o cálculo dos resultados esperados, recorreu-se aos resultados laboratoriais, para calcular a quantidade de sólidos voláteis e posteriormente produção de biogás esperada. Os resultados obtidos na fração de sólidos voláteis destruídos foram comparados com os valores teóricos esperados, apresentados na secção 3.5. Estes cálculos encontram-se no anexo B.

Na Figura 5.1, encontra-se a produção esperada de biogás para os ensaios 2, 3 e 4.

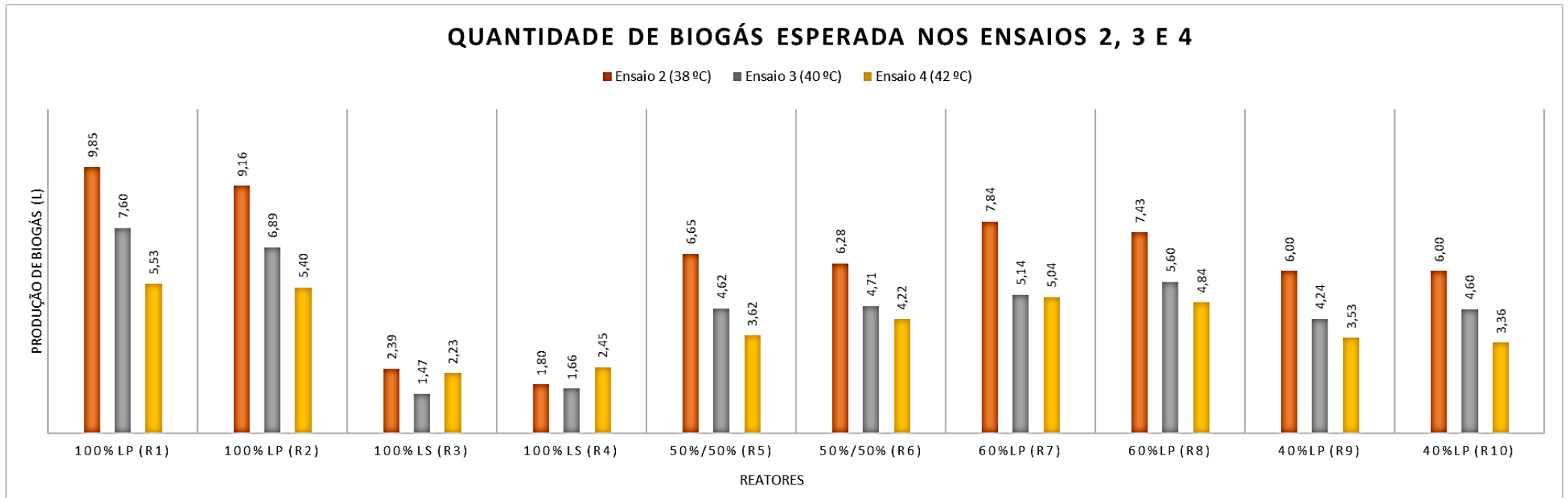


Figura 5. 1 Resultados esperados para os diferentes ensaios.

Figura 5. 2 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP. Figura 5. 3 Resultados esperados para os diferentes ensaios.

De acordo com a figura acima, à exceção dos reatores 3 e 4, espera-se um aumento na produção de biogás conforme a diminuição da temperatura, dentro da gama mesofílica. Esta produção foi calculada com base nos SV destruídos, os quais dependem não só da temperatura, mas também das características iniciais do substrato.

Tendo em conta a Figura 5.1, teoricamente, o valor ótimo para o desenvolvimento das bactérias ronda os 38 °C, segundo a secção 3.3.1.1, daí a produção ser mais elevada no ensaio 2. À medida que a temperatura vai aumentando, a sobrevivência das bactérias vai diminuindo uma vez a temperatura se aproxima das temperaturas termofilias, sendo que nem todas as bactérias conseguem desenvolver-se nessa gama e por isso mesmo a produção de biogás decresce.

Relativamente aos reatores 3 e 4, estes não estão de acordo com o concluído anteriormente, uma vez que estes apresentam produções mais baixas como era de esperar pois apenas estão presentes lamas secundárias, talvez devido ao facto de os valores serem tão baixos apenas se verificam pequenas diferenças entre eles.

De acordo com o anexo C, calculou-se ainda a redução de matéria volátil nos diferentes ensaios. Relativamente aos resultados obtidos para o ensaio realizado a 38 °C, a percentagem de redução de matéria volátil média foi de 37%, no caso do ensaio a 40 °C foi de 33% e no ensaio realizado a 42 °C a redução foi de 32%. Considerando que quanto maior for a percentagem de redução de matéria volátil, maior é a conversão em biogás, o ensaio realizado a 42 °C seria o que produziria menor quantidade e o ensaio realizado a 38 °C seria o que produziria mais biogás. No entanto, deve ser salientado que os ensaios a diferentes temperaturas foram feitos em datas diferentes, o que teve como consequência diferenças nas características iniciais das lamas, o que introduz uma potencial variável adicional e que dificulta a análise dos resultados obtidos.

5.2 Resultados obtidos

Tendo em conta que através da montagem piloto só é possível medir o volume de água que é enviada do garrafão para o exterior, a medição de biogás é feita por diferença do volume total com o volume que é movido para o exterior. Foi medido o biogás três vezes por dia, antes e depois da agitação, o que perfaz seis medições por dia, à exceção do fim de semana e dos feriados. Estas seis medições durante 22 dias, e registadas em excel, foram representadas sob a forma de gráficos para facilitar a análise e discussão dos mesmos.

Posteriormente, foram comparados com os valores teoricamente esperados e com os valores experimentais reunindo-os num único gráfico de forma a comparar a produção dos diferentes reatores ao longo do tempo. Este procedimento foi feito para os ensaios 2, 3 e 4 a 38, 40 e 42 °C, respetivamente.

Ensaio 2 - 100% LP

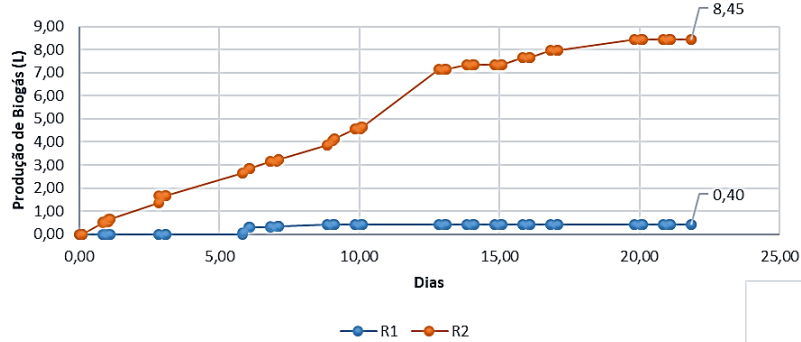


Figura 5. 4 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.

Ensaio 2 - 100% LS

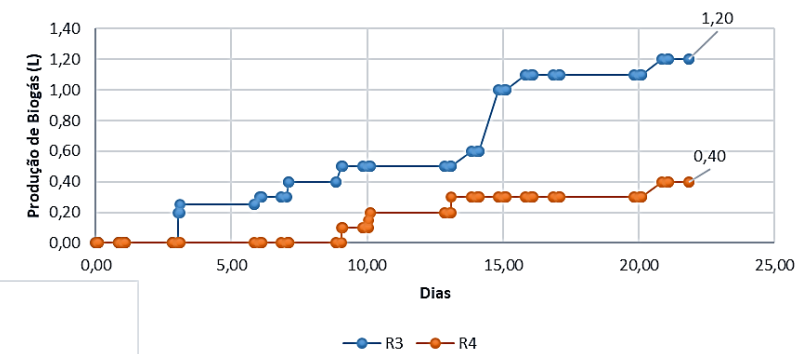


Figura 5. 7 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.

Ensaio 2 - 50%/50%

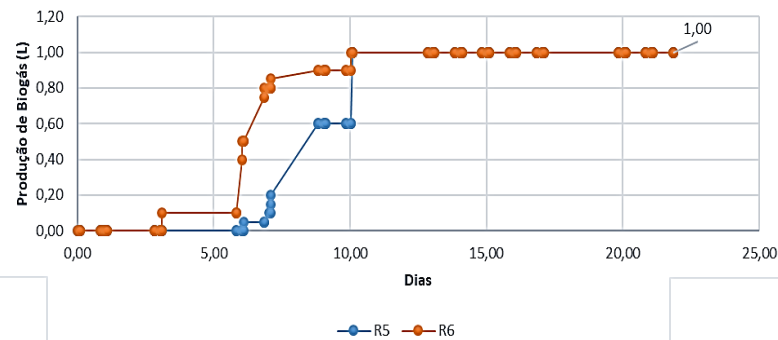


Figura 5. 10 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 5 e 6, com substrato 50% de LP e 50% LS.

Ensaio 2 - 60% LP

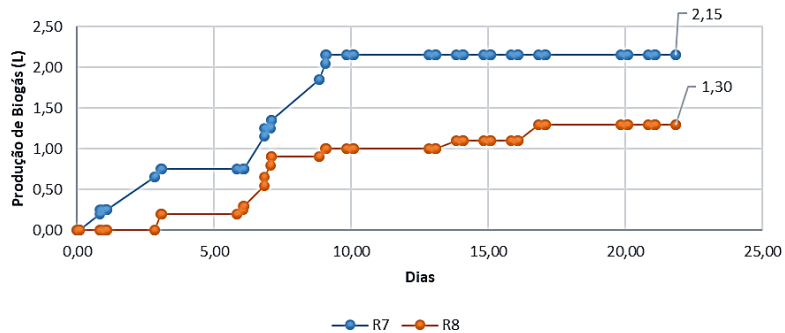


Figura 5. 13 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.

Ensaio 2 - 40% LP

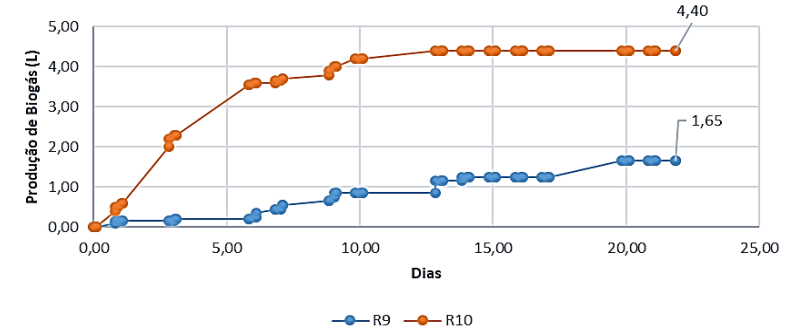


Figura 5. 16 Resultados obtidos do ensaio 2 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.

Analisando os 5 diferentes gráficos do ensaio 2 verifica-se que, à exceção do gráfico 50/50 (%), não apresentam resultados concordantes entre os ensaios duplicados devido a problemas experimentais, tais como fugas, entupimentos e até mesmo devido à falta de agitação. Assim sendo, uma vez que as produções são muito distantes entre si, não é possível fazer a média entre eles e antes de desprezar algum reator, na figura 5.8, é apresentado um gráfico que compara a produção esperada com a produção obtida neste ensaio, de forma a identificar quais dos ensaios se aproximam mais do comportamento esperado

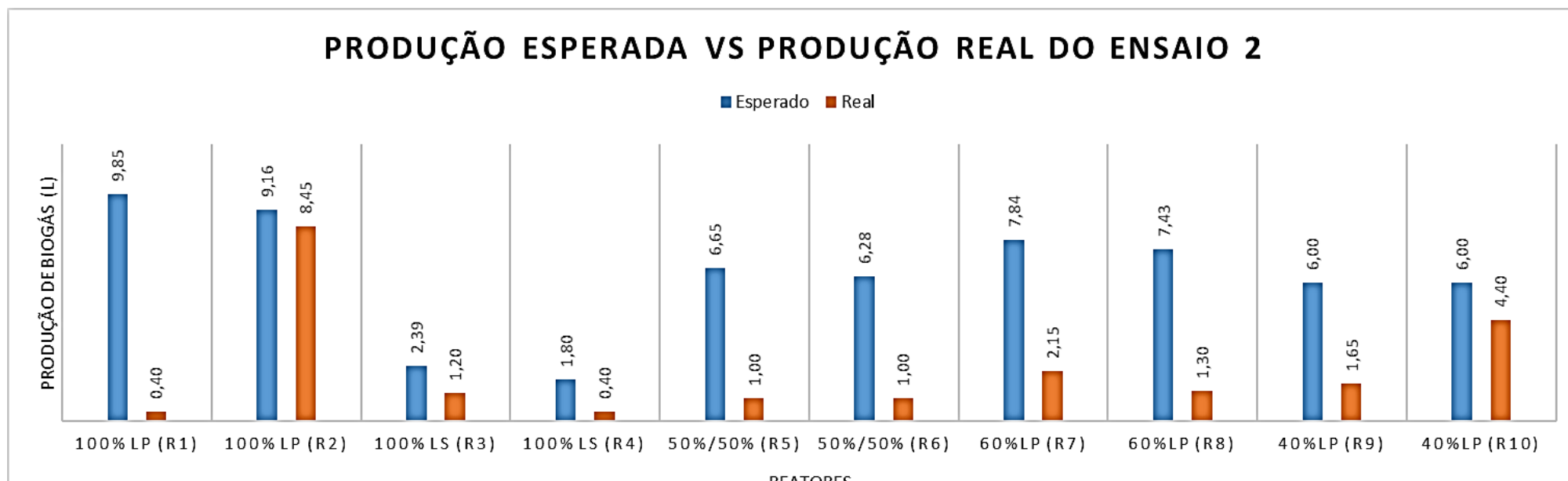


Figura 5. 19 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 2.

Figura 5. 20 Gráfico global do ensaio 2, com os 5 resultados mais representativos. Figura 5. 21 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 2.

A partir da Figura 5.7, conclui-se que se devem desprezar os resultados obtidos nos reatores 1, 4, 8 e 9, uma vez que as produções obtidas não são de todo concordantes com as produções dos reatores duplicados e estão muito afastadas das produções esperadas.

No entanto, à exceção dos ensaios 2 e 10, todos os restantes reatores ficaram bastante aquém do que era esperado produzir, o que mostra que este ensaio não correu como era esperado devido aos problemas mencionados acima.

Assim, de forma a analisar o ensaio 2 de forma global, é apresentado na Figura 5.8, um gráfico com as cinco melhores produções obtidas ao longo dos 22 dias, que correspondem aos resultados menos afetados de erros. Uma vez que o reator 5 e 6 apresentam produções semelhantes, neste gráfico é apresentada a média de ambos.

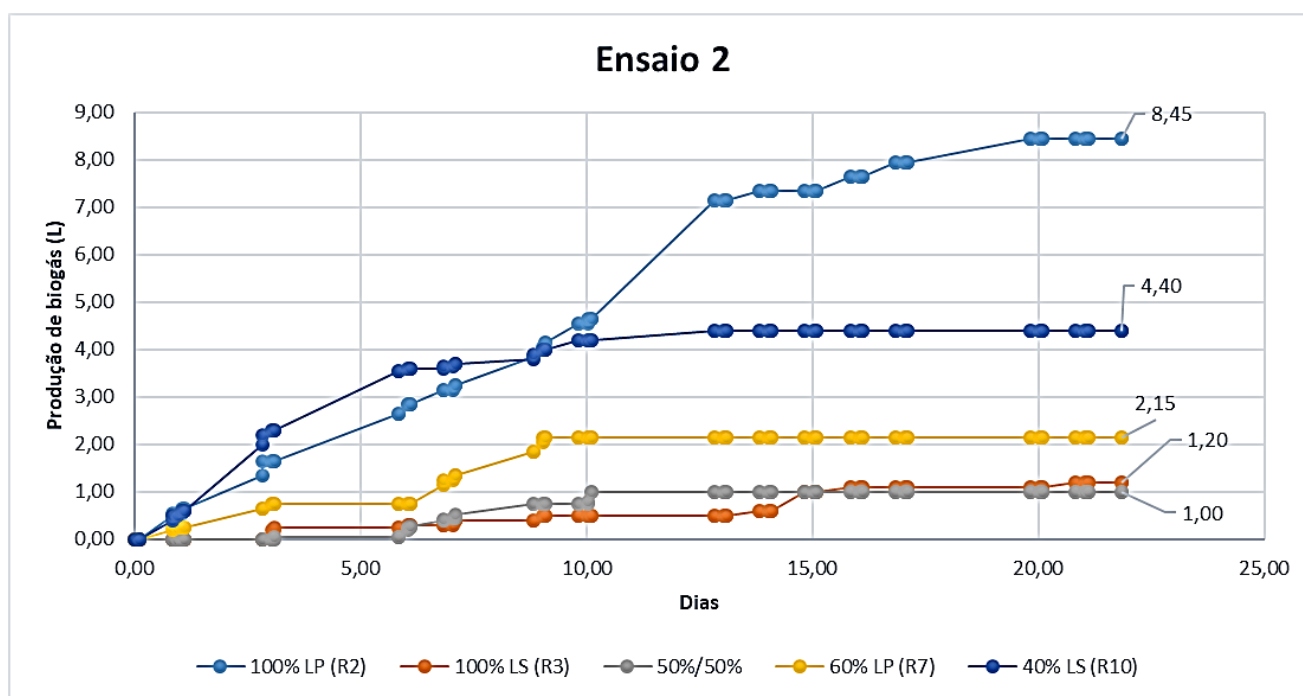


Figura 5. 22 Gráfico global do ensaio 2, com os 5 resultados mais representativos.

Tabela 5. 4 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.8. Figura 5. 23 Gráfico global do ensaio 2, com os 5 resultados mais representativos.

Através da Figura 5.8, verifica-se que no ensaio 2 o reator que apresentou uma maior produção foi o R2, com substrato 100% LP e uma produção de 8,45 L, seguindo-se o R10, com 40% de LP e com uma produção de 4,40 L. Os reatores que apresentaram uma menor produção foram o R7, com 60% LP (2,15 L), o R3, com 100% LS (1,20 L) e por fim o 50/50% (1 L).

Esperava-se que a produção de biogás fosse maior quanto maior fosse a percentagem de lamas primárias, presentes no substrato, de acordo com os resultados esperados, no entanto isso não aconteceu em todos os ensaios.

Por fim, através da Tabela 5.4 é possível avaliar a evolução de cada reator no que se refere ao volume de água deslocado em cada intervalo de tempo ao longo do ensaio.

Os valores que se encontram sombreados a amarelo, representam os fins de semana. Esta tabela mostra a importância da agitação neste estudo, uma vez que as produções de biogás durante estes dois dias do fim de semana foram praticamente nulas à exceção de três casos pontuais onde a produção variou de 1,0 L a 2,5 L.

Tabela 5. 5 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.8.

Ensaio 2 (tempo decorrido em dias)	100% LP (R2)	100% LS (R3)	50/50	60% LP (R7)	40% LP (R10)
De 0 a 3,10	1,7	0,3	0,0	0,8	2,3
De 3,10 a 5,83	1,0	0,0	0,0	0,0	1,3
De 5,83 a 7,10	0,6	0,2	0,5	0,6	0,2
De 7,10 a 8,83	0,6	0,0	0,2	0,5	0,1
De 8,83 a 10,10	0,8	0,1	0,3	0,3	0,4
De 10,10 a 12,83	2,5	0,0	0,0	0,0	0,2
De 12,83 a 17,10	0,8	0,6	0,0	0,0	0,0
De 17,10 a 19,83	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
De 19,83 a 21,83	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0

Durante este ensaio houve mais paragens do que era previsto devido à ocorrência de feriados, no entanto e de uma forma geral, como era previsto a produção decresceu ao longo do tempo e a morte das bactérias ocorreu devido à falta de substrato fresco.

Este ensaio não correu como se esperava, não permitiu obter resultados concordantes entre duplicados, nem concordantes com a previsão teórica, devido aos problemas já mencionados, no entanto ajudou a conhecer melhor a instalação em si para que os restantes ensaios corressem melhor.

Nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 encontram-se os gráficos de cada reator, bem como de cada duplicado relativos ao ensaio 3, que decorreu a 40 °C.

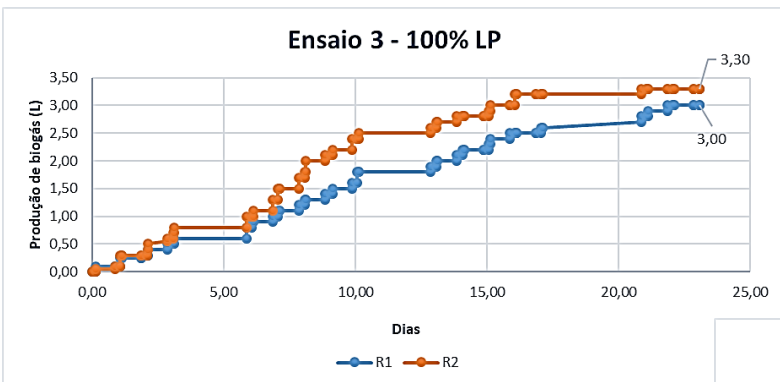


Figura 5. 25 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.

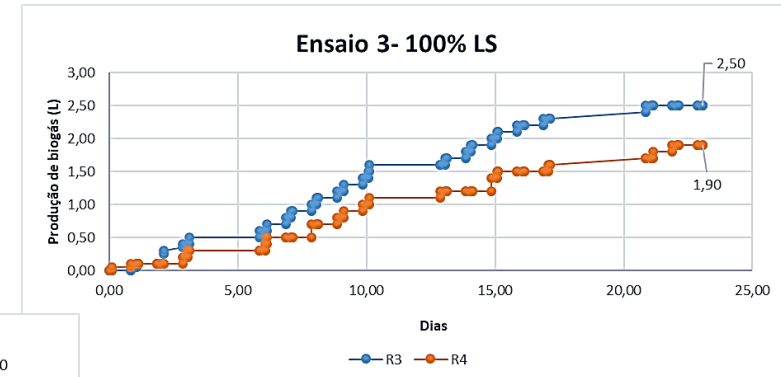


Figura 5. 28 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.

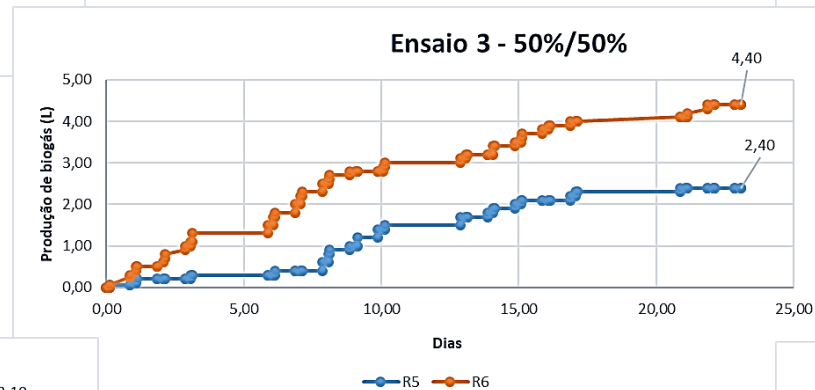


Figura 5. 31 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 5 e 6, com substrato 50% LP e 50% LS.

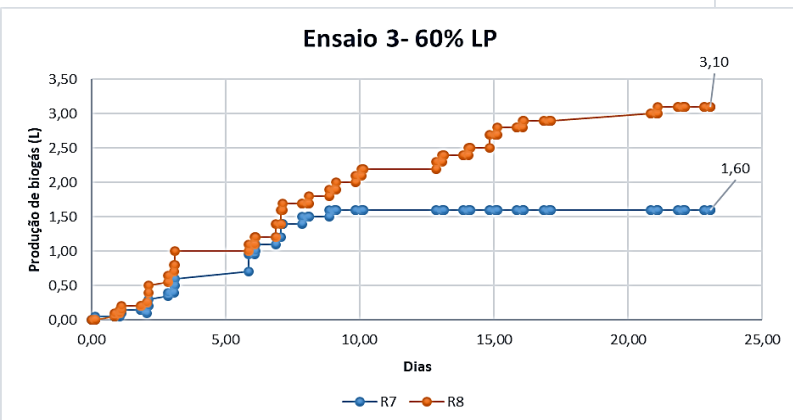


Figura 5. 34 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.

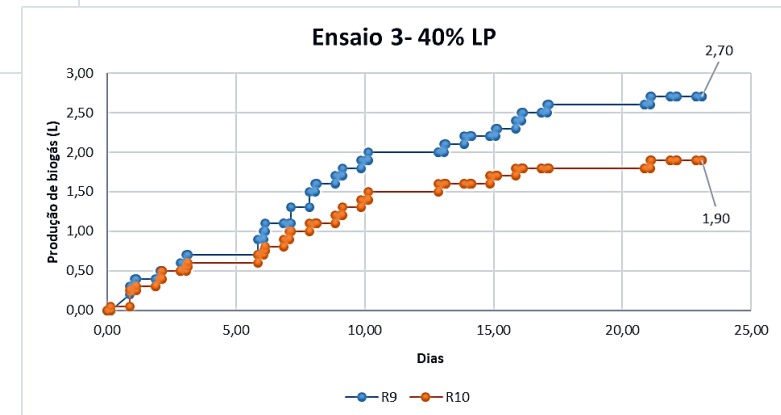


Figura 5. 37 Resultados obtidos do ensaio 3 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.

Relativamente aos cinco gráficos apresentados anteriormente, as produções obtidas dos reatores encontram-se mais concordantes entre si em comparação com produções obtidas no ensaio 2, no entanto, no que diz respeito aos reatores 5 e 6 e aos reatores 7 e 8, a produção obtida não foi tão concordante assim, uma vez que os reatores 5 e 7, durante o ensaio, apresentaram inúmeras fugas de biogás e alguns entupimentos com lamas na ligação. De forma a visualizar melhor possíveis discordâncias, na Figura 5.14 mostra a produção esperada em comparação com a produção obtida.

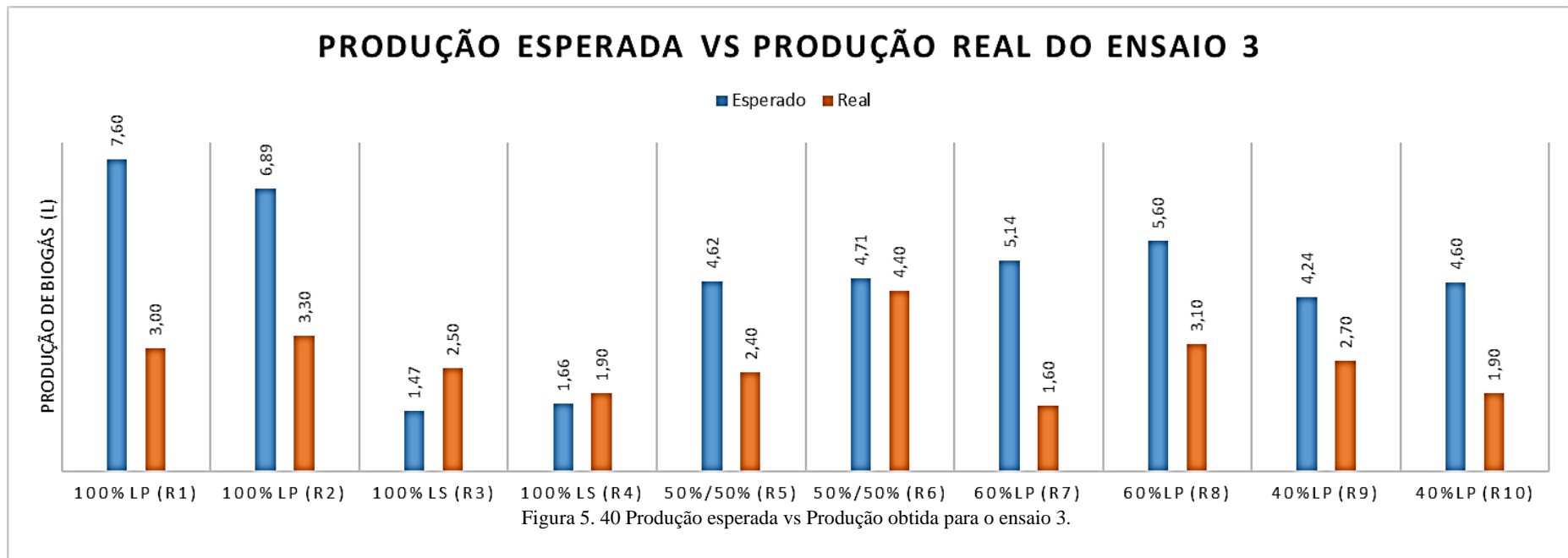


Figura 5. 41 Gráfico global do ensaio 3, com os 5 resultados mais representativos. Figura 5. 42 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 3.

Através da figura acima, os reatores 1 e 2, apresentam alguma discrepância face ao que era esperado obter, no entanto, estes são concordantes entre si. Quanto aos reatores 3 e 4, o reator 3 produziu mais do que era esperado, isso pode ter acontecido devido a problemas laboratoriais na medição dos sólidos, contudo, estes dois reatores apresentam uma pequena diferença de 0,60 L na produção obtida, tornando este desvio aceitável face à diferença entre os reatores 5 e 6, de 2 L, e dos reatores 7 e 8, de 1,5 L. Quase a ultrapassar a gama do aceitável (1 L de diferença), os reatores 9 e 10 para além de estarem aquém do que era esperado, obtiveram uma diferença na produção de 0,90 L.

Da análise feita à Figura 5.14, considerou-se que os resultados dos reatores 5 e 7 deveriam ser desprezados devido às razões mencionadas acima, e construiu-se um gráfico com as melhores cinco produções obtidas, que se consideram ser os ensaios menos afetados de erros. É de mencionar que os reatores 1 e 2, os reatores 3 e 4 e os reatores 9 e 10, apresentam resultados concordantes entre si, e, portanto, foi calculada a média das produções obtidas, as quais se apresentam na Figura 5.15.

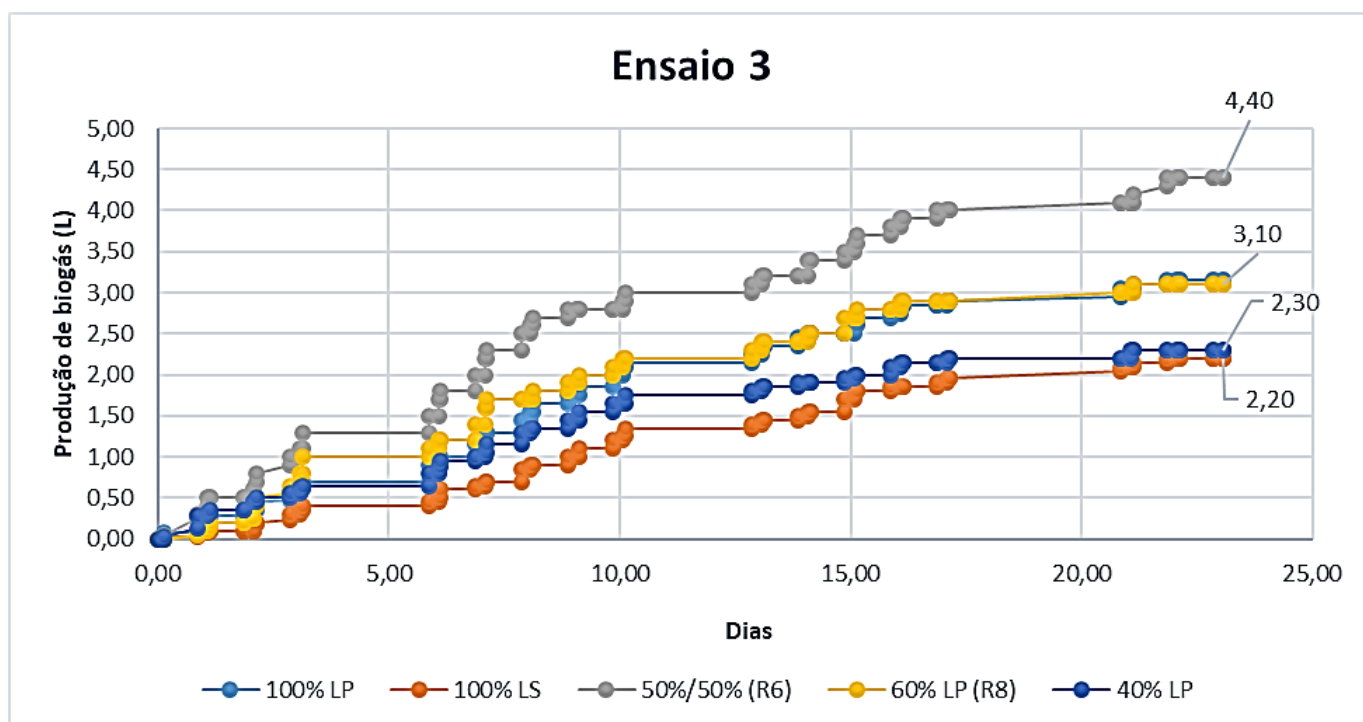


Figura 5. 43 Gráfico global do ensaio 3, com os 5 resultados mais representativos.

Tabela 5. 7 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.15. Figura 5. 44 Gráfico global do ensaio 3, com os 5 resultados mais representativos.

Ainda através da Figura 5.14, seria esperada uma maior produção de biogás conforme é maior a proporção de lamas primárias, mas não foi propriamente o que aconteceu neste ensaio. O reator 6 (50% LP) foi o reator que obteve uma maior produção com 4,40 L, seguindo os reatores 100% LP, 60% LP, 40% LP e por fim com 2,20 L o reator com 100% LS.

A tendência da produção obtida segue a mesma da produção esperada, à exceção do reator 6 (50% LP). Antes do ensaio ter dado início, todas as instalações foram melhoradas, no entanto, as fugas mantiveram-se. No caso da instalação do reator 6 as fugas aparentemente eram menores, daí a produção obtida ter sido a mais alta.

Mais uma vez, na Tabela 5.5, mostra a evolução da produção de biogás durante o período do ensaio 3, incluindo os fins de semana (sombreados a amarelo).

Tabela 5. 8 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.15.

Ensaio 3 (tempo decorrido em dias)	100% LP	100% LS	50/50 (R6)	60% LP (R8)	40% LP
De 0 a 3,13	0,7	0,4	1,3	1,0	0,7
De 3,13 a 5,86	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
De 5,86 a 10,13	1,5	1,0	1,7	1,2	1,1
De 10,13 a 12,86	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
De 12,86 a 17,13	0,8	0,6	1,0	0,7	0,5
De 17,13 a 20,86	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
De 20,86 a 23,07	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1

A Tabela 5.5 mostra mais uma vez a importância da agitação, fundamentalmente durante o fim de semana, uma vez que nesses períodos a produção máxima foi de 0,1 L.

Relativamente às produções obtidas durante as semanas em que decorreu o ensaio, com exceção dos três primeiros dias, a produção tornou-se cada vez menor até atingir valores praticamente nulos. Estes três primeiros dias apresentaram valores inferiores aos da segunda semana, uma vez que o ensaio deu início a meio da semana, daí a semana não ser apresentada na totalidade.

Ainda através desta tabela, confirma-se mais uma vez que o reator que mais produziu foi o 50/50 (%).

Para finalizar, são apresentados nas Figuras 5.16 a 5.20 os gráficos que dizem respeito às produções obtidas no quarto e último ensaio, que decorreu a uma temperatura de 42 °C.

Ensaio 4- 100% LP

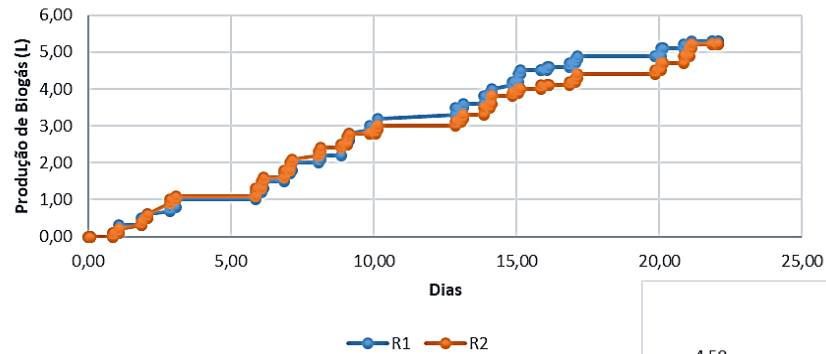


Figura 5. 16 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.

Ensaio 4- 100% LS

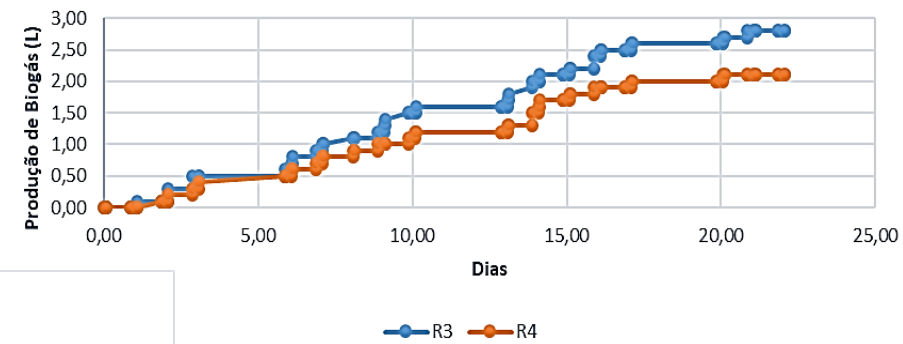


Figura 5. 17 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.

Ensaio 4- 50%/50%

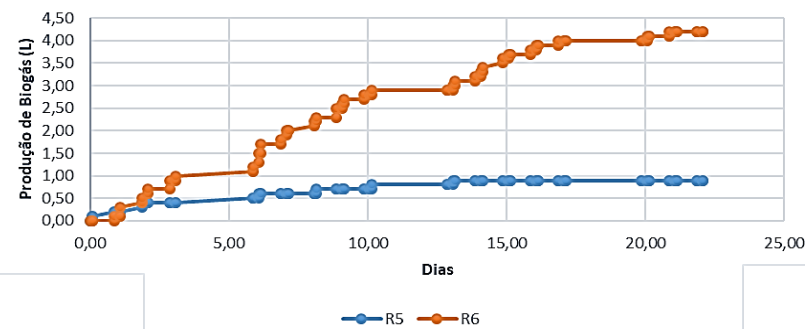


Figura 5. 18 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 5 e 6, com substrato 50% LP e 50% LS.

Ensaio 4- 60% LP

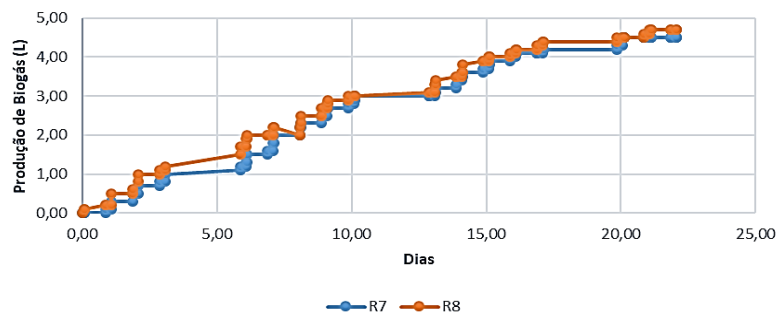


Figura 5. 19 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.

Ensaio 4- 40% LP

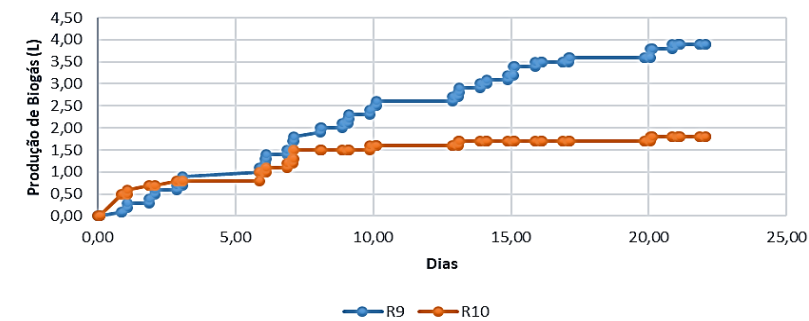


Figura 5. 20 Resultados obtidos do ensaio 4 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.

Realizando uma breve análise aos gráficos apresentados acima à exceção das figuras 5.19 e 5.20, todas as produções obtidas e apresentadas nas restantes figuras são concordantes.

Na Figura 5.21 é apresentado um gráfico que mostra a produção obtida em cada reator, bem como a produção esperada.

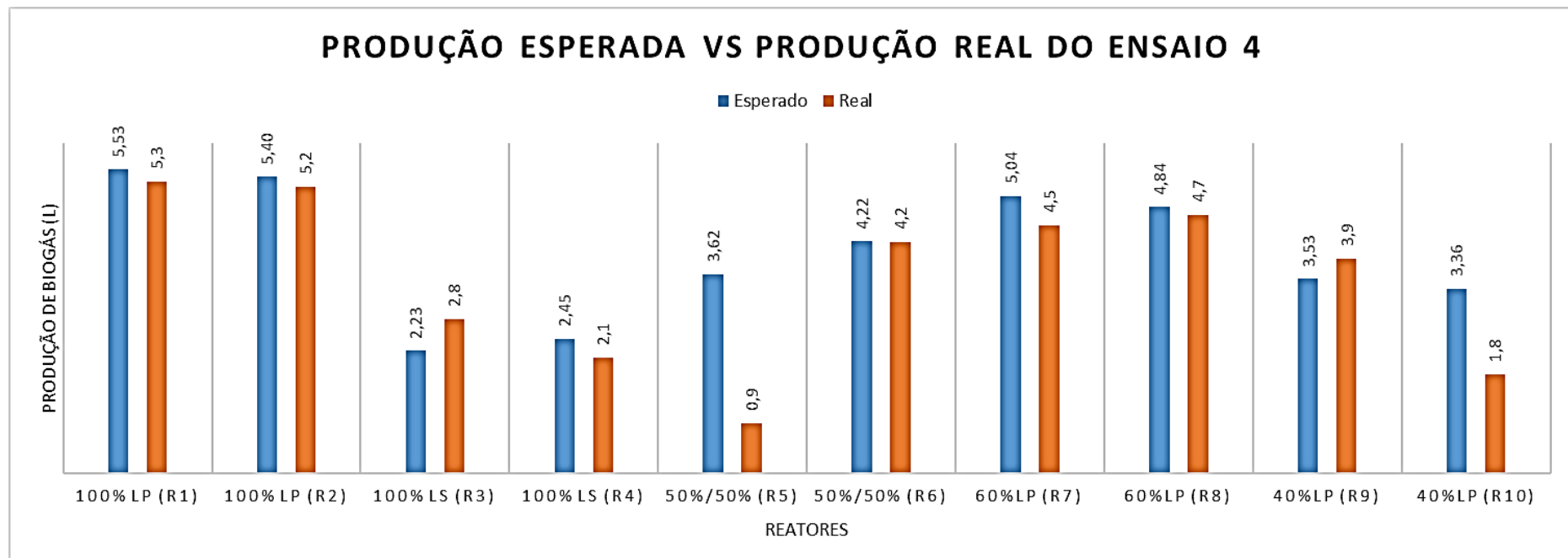


Figura 5. 46 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 4.

Figura 5. 47 Gráfico global do ensaio 4, com os 5 resultados mais representativos.Figura 5. 48 Produção esperada vs Produção obtida para o ensaio 4.

Feita a análise à Figura 5.21, a produção obtida pela maioria dos reatores foi semelhante à que se esperava e tendo isso em consideração apenas foram desprezados os resultados dos reatores 5 e 10, uma vez que apresentaram problemas no decorrer do ensaio e consequentemente a produção obtida ficou aquém da esperada.

Através desta figura ainda é possível concluir que dos três ensaios realizados, este foi o que obteve resultados mais concordantes entre os reatores duplicados e com maior concordância entre a produção obtida e a esperada.

Uma vez que os reatores 5 e 10 foram excluídos da análise a este quarto ensaio, e tendo em conta que os restantes reatores apresentaram produções semelhantes, foi feita a média dos duplicados e representados no gráfico da Figura 5.22.

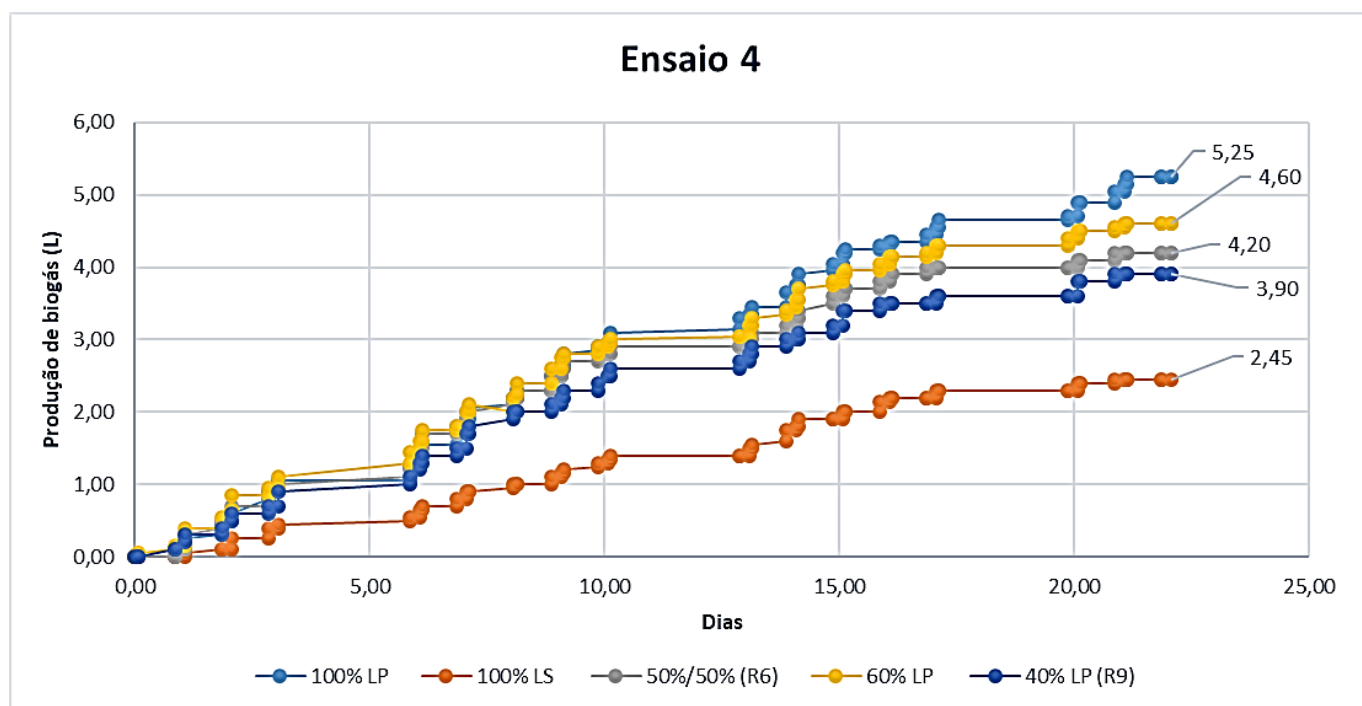


Figura 5. 49 Gráfico global do ensaio 4, com os 5 resultados mais representativos.

Tabela 5. 10 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.22.Figura 5. 50 Gráfico global do ensaio 4, com os 5 resultados mais representativos.

Segundo a Figura 5.21, seria de esperar uma maior produção de biogás conforme fosse maior a proporção de lamas primárias, e foi o que se obteve neste quarto ensaio.

O reator isento de lamas secundárias produziu 5,25 L, seguindo-se o reator com 60% de lamas primárias, com 4,60 L. Os reatores com 50% e 40% de lamas primárias produziram 4,20 L e 3,90 L, respetivamente e por fim, o reator isento de lamas primárias produziu 2,45 L.

De forma a avaliar a evolução dos reatores ao longo do tempo, é apresentada na tabela 5.6 os volumes de água deslocados ao longo do ensaio 4, apresentando-se os dias correspondentes ao fim de semana sombreados a amarelo.

Tabela 5. 11 Evolução do volume de água deslocada para cada reator ao longo dos dias, tendo em conta a Figura 5.22.

Ensaio 4 (tempo decorrido em dias)	100% LP	100% LS	50/50 (R6)	60% LP	40% LP (R9)
De 0 a 3,07 dias	1,1	0,5	1,0	1,1	0,9
De 3,07 a 5,86	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1
De 5,86 a 10,13	2,1	0,9	1,8	1,7	1,6
De 10,13 a 12,86	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
De 12,86 a 17,13	1,5	0,9	1,1	1,3	1,0
De 17,13 a 19,86	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
De 19,86 a 22,07	0,6	0,2	0,2	0,3	0,3

De acordo com a Tabela 5.6, a partir da segunda semana a produção de biogás diminuiu devido à falta de substrato fresco. Mais uma vez, as produções obtidas durante o fim de semana foram nulas por falta de agitação e pela falta de aquecimento dos reatores, devido à evaporação de água no banho termostático.

Comprova-se de novo a maior produção de biogás para os reatores com maior proporção de lamas primárias, sendo que os reatores isentos de lamas secundárias produziram um valor máximo durante uma semana de 2,1 L enquanto que os isentos de lamas primárias produziram no máximo 0,9 L.

Dos ensaios realizados, este foi o que cumpriu melhor com o esperado, devido ao maior conhecimento adquirido na operação da instalação e às melhorias introduzidas na instalação.

5.3 Média de produção de biogás diária

De forma a avaliar a produção dos 10 reatores durante os ensaios 2, 3 e 4, são apresentadas na Figura 5.23 as médias de produção diária de biogás para os ensaios realizados.

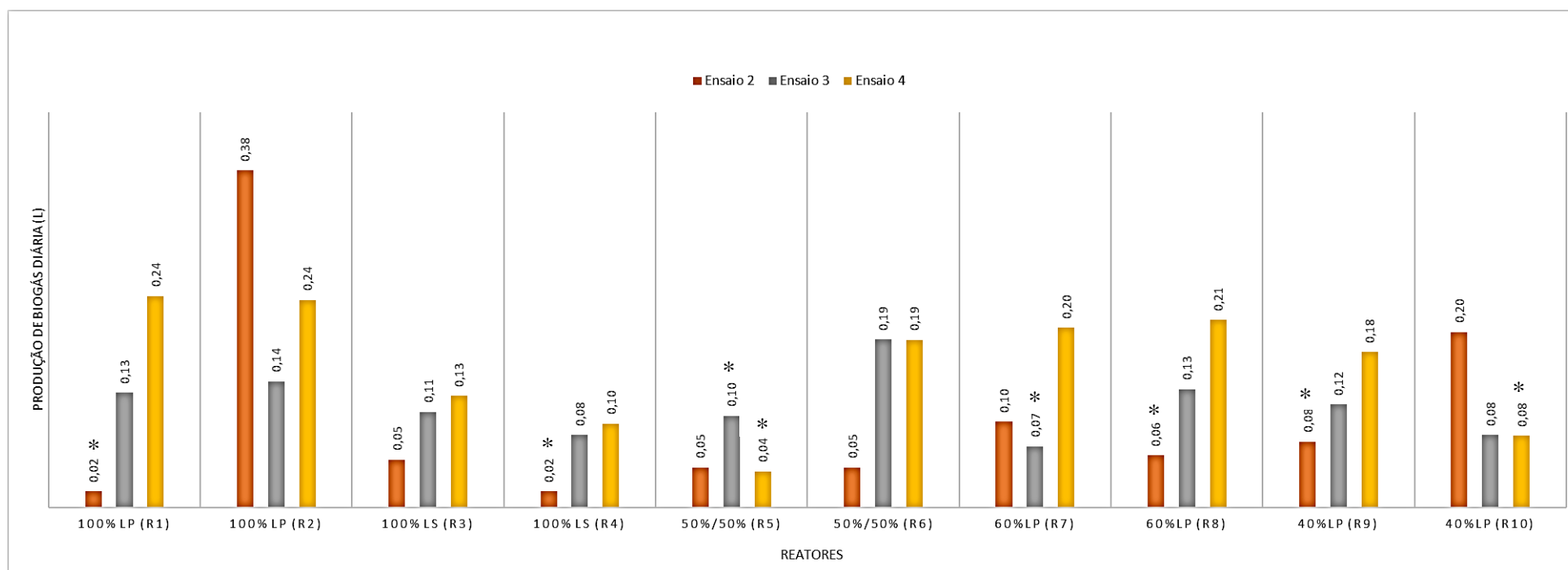


Figura 5. 52 Médias de produção diária de biogás nos ensaios 2, 3 e 4.

Os reatores representados com um asterisco (*), presentes na figura 5.23, apresentaram problemas a nível de operação (fugas/agitação) durante o ensaio em causa.

De acordo com a Figura 5.23, à exceção dos reatores 2, 5 e 10, os restantes reatores produziram uma maior quantidade de biogás durante o ensaio 4, o que contraria os resultados esperados.

No caso dos reatores 5 e 10 se não tivessem apresentado alguns problemas durante o ensaio 4, muito provavelmente estes teriam produzido resultados mais concordantes entre os duplicados.

Para além disto, à exceção dos reatores 2, 7 e 10, o ensaio onde se obteve uma produção menor foi no ensaio 2, contrariando novamente os resultados esperados.

Ao longo do estudo, o controlo e o conhecimento da instalação foi melhorando, levando a que os ensaios apresentassem resultados mais concordantes entre os reatores duplicados e com os valores esperados.

No Anexo D está presente a análise realizada à qualidade do biogás, no entanto, devido a problemas do medidor não foi possível obter um conjunto de valores suficiente, pelo que não foi possível tirar conclusões. Esta análise teve como objetivo avaliar essencialmente a percentagem de CH_4 presente em cada reator.

6. Conclusões

O objetivo principal deste estudo era implementar uma instalação piloto do digestor anaeróbio de forma a avaliar a produção de biogás fazendo variar dois parâmetros influenciadores, a proporção de lamas primárias e secundárias à entrada e a temperatura.

Numa fase inicial foi fundamental realizar um ensaio preliminar de forma a identificar as quantidades necessárias de inóculo e substrato a adicionar em cada reator.

Realizaram-se três ensaios, a temperaturas diferentes, 38, 40 e 42 °C, com 5 reatores, em duplicado, onde se fez variar a proporção de lamas primárias (LP) e secundárias (LS): 100%, 60%, 50% e 40% de LP e 100% LS.

Antes e depois de cada ensaio, era analisada uma amostra de lamas de cada reator ((sólidos totais, sólidos voláteis, alcalinidade, ácidos gordos voláteis, pH e temperatura)) de forma a que se pudesse fazer uma previsão da produção de biogás com base na quantidade de sólidos voláteis destruídos, o que dependia das características dos bio-sólidos presentes inicialmente (e que foi diferente de ensaio para ensaio) assim como da temperatura, a qual influencia a cultura de microrganismos presentes e a respetiva cinética. De acordo com essas previsões, para o ensaio realizado a 38 °C esperava-se obter uma produção de biogás maior face ao ensaio realizado a 42 °C, e que a 40 °C a produção estaria entre a produção obtida a 38 e 42 °C, o que é confirmado pela informação presente na literatura. Para além disso, esperava-se uma maior produção de biogás quanto maior fosse a percentagem de LP.

Os resultados obtidos nem sempre demonstraram o esperado. Foram obtidas, em alguns casos, melhores produções nas temperaturas mais altas, com resultados mais coerentes entre os reatores duplicados. No entanto estas observações dependem fortemente das características iniciais do conteúdo de cada reator, que foi diferente de ensaio para ensaio pois foram realizados em períodos diferentes. Por outro lado, o melhor conhecimento da instalação levou a diversas melhorias realizadas ao longo do tempo, o que permitiu reduzir fugas de biogás e consequentemente o registo de maiores produções.

Relativamente ao efeito da proporção de lamas primárias e secundárias, apenas no quarto ensaio se obteve a tendência de produção esperada, o reator com 100% de LP foi o que apresentou uma maior produção e o reator com 100% de LS com a menor produção. Quanto ao terceiro ensaio, à exceção do reator com 50% de LP, seguiu a tendência esperada. O segundo ensaio não seguiu a tendência esperada, o que se pode atribuir aos problemas de fugas/agitação que existiam inicialmente e que foram minimizados ao longo do estudo.

Uma vez que a composição do biogás (percentagem de metano, dióxido de carbono, oxigénio e sulfureto de hidrogénio) não foi determinada sempre devido a avarias no medidor, não foi possível extrair conclusões deste conjunto de resultados experimentais.

Uma vez que este estudo envolve o trabalho com bactérias e com gases, não é de todo fácil o controlo do processo. Assim, como propostas futuras para este tipo de trabalhos, o que se propõe é vedar muito bem todas as ligações que existam na instalação, evitar a evaporação de água nos banhos, incluir um sistema de agitação contínua e para além disso realizar os ensaios para avaliação do efeito da variação de qualquer parâmetro em duplicado ou triplicado, de forma a validar os resultados obtidos. Sugere-se também a realização de medições diárias da composição do biogás.

Bibliografia

- [1] “Unicef.” [Online]. Available: <https://www.unicef.org/mozambique/comunicados-de-imprensa/1-em-cada-3-pessoas-no-mundo-n%C3%A3o-tem-acesso-%C3%A1gua-pot%C3%A1vel-unicef-oms>. (acesso a 27 de fevereiro de 2019)
- [2] “SIMDOURO- Quem somos” [Online]. Available: <https://www.simdouro.pt/dados.php?ref=quem-somos>. (acesso a 2 de janeiro de 2019)
- [3] “SIMDOURO.” [Online]. Available: <http://www.simdouro.pt/dados.php?ref=etarpacodesousa>. (acesso a 2 de janeiro de 2019)
- [4] O. Pinto (2018), Integração nas atividades do laboratório de apoio à ETAR de Paço de Sousa, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [5] Empreitada de conceção- construção da ETAR de Paço de Sousa, Soares da Costa (2015).
- [6] G. Collins, E. D. van Hullebusch, G. Esposito, C. Carliell-Marquet and F. G. Fermoso (2018), Anaerobic Digestion, *Frontiers in Microbiology*, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* and *Frontiers in Environmental Science*, *frontiers in Microbiology*, Vol 8, Article 664
- [7] F. Florindo (2009), *Caracterização das lamas geradas e sua valorização nos subsistemas dos SMAS-Sintra*, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente - Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.
- [8] S. Leonardo (2012), *Caracterização do Digestor Anaeróbio de Lamas Biológicas da ETAR do Choupal, em Coimbra*, Tese de Mestrado em Engenharia Química e Biológica- Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- [9] C. Silva (2016), *Proposta de Biodigestor anaeróbio para co-digestão dos lodos gerados na ETE Brasília Norte e resíduos sólidos urbanos*, Tese de Bacharelato em Engenharia Civil e Ambiental -Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
- [10] M. Pires (2015), *Análise da eficiência do processo de digestão anaeróbia de lamas da ETAR municipal do Choupal*, Tese de Mestrado em Engenharia Química - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

- [11] A. Ferreira (2015), *Avaliação da viabilidade de aproveitamento do biogás produzido no tanque secundário do sistema de tratamento de lamas (SIMRIA)*, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente- Universidade de Aveiro.
- [12] C. Gonçalves (2012), *Modelação do processo de digestão anaeróbia da FORSU à escala industrial*, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente - Técnico de Lisboa.
- [13] G. Silveira (2009), *Estudo de co-digestão anaeróbia de lamas domésticas com o efluente da indústria da fermentação da levedura do pão da empresa Mauri Fermentos*, Tese de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa.
- [14] S. Soares (2013), *Estudo sobre o tratamento anaeróbio de águas residuais urbanas em reator de leito fixo de lamas de fluxo ascendente em escala piloto*, Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente - Faculdade de Engenharia do Porto.
- [15] J. F. Malina & F. G. Pohland, 1992, *Design of Anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes*, Volume 7 of Water quality management library.
- [16] Metcalf & Eddy, Revised by George Tchobanoglous, Franklin Burton and H. David Stensel (2003). *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse*, Fourth Edition.
- [17] F. Donath (2010), *Pré-dimensionamento de um digestor anaeróbio para o tratamento do lodo de estação de tratamento de esgoto doméstico*, Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental.
- [18] C. Morosini, F. Conti, V. Torretta, E. C. Rada, G. Passamani, M. Schiavon, L. I. Cioca³ & M. Ragazzi (2016), University of Insubria, Italy, University of Trento, Italy, Lucian Blaga University of Sibiu, Romania, *Biochemical Methane potencial assays to test the biogás production from the Anaerobic digestion of sewage sludge and other organic matrices*, WIT conferences, 205, 1743-3541
- [19] W. N. Schirmer, J. F. T. Jucá, A. R. P. Schuler, S. Holanda and L. L. Jesus (2014), Environmental Engineering Department, University Irati, Brazil, Civil Engineering Department, University of Pernambuco, Brazil, Chemical Engeneering Department, University Pernambuco, Brazil, *Methane production in Anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) landfill: evaluation in refuse of diferent ages*, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31 (2), 373 – 384.

[20] L. Yurchenko (2016), *Potencial bioenergético dos excrementos de animais de estimação, no atual contexto de gestão de resíduos biodegradáveis em Portugal*, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Tese de Mestrado em Energias Sustentáveis.

A. Cálculo da proporção de lamas a utilizar na instalação piloto

No caso da instalação piloto, o volume útil do reator foi de 1 L sem recirculação de lamas. Foi usado um volume inicial de lamas de 1,3 L, de forma a que 0,3 L fosse retirado para análise laboratorial:

Relativamente ao digestor real, e como já foi mencionado secção 4.2, ele possui um volume de 1800 L onde há recirculação de 100 L de lamas diariamente. Na instalação o piloto, foi colocada uma proporção de inóculo do digestor real.

Sendo que 1800 L equivale a 100%, 100 L irá equivaler a 5,56%. Isto indica que diariamente são introduzidas 5,56% de lamas mistas no digestor que contem lamas digeridas. De forma a manter estas proporções, é posteriormente calculada a quantidade de lamas a adicionar ao reator de 1L, mantendo esta percentagem. Assim sendo:

Tendo em conta agora que 1,3 L equivale a 100%, 5,56% equivale a 72 ml. Este último volume calculado, corresponde então à quantidade de substrato a adicionar ao inóculo que apresenta um volume de 1228 ml. Na Tabela A.1 encontram-se os volumes de inóculo e substrato a adicionar a cada reator.

Tabela A. 1 Volumes a adicionar de inóculo e substrato na proporção de 95% / 5%, respetivamente, a cada reator.

Volume a adicionar (mL)			
Reatores	Inóculo	LP	LS
100% LP (R1)	1228	72	0
100% LP (R2)	1228	72	0
100% LS (R3)	1228	0	72
100% LS (R4)	1228	0	72
50%/50% LP (R5)	1228	36	36
50%/50% LP (R6)	1228	36	36
60% LP (R7)	1228	43	29
60% LP (R8)	1228	43	29
40% LP (R9)	1228	29	43
40% LP (R10)	1228	29	43

A partir das proporções encontradas, foi iniciado o primeiro ensaio, ensaio 1. Este ensaio foi denominado de ensaio preliminar uma vez que dada a proporção do substrato ser tão baixa, o ensaio não produziu mais que 1,5 L de biogás e teve a duração apenas de 12 dias, ou seja, isto indica que seria necessário aumentar a proporção de substrato para que se possa tirar conclusões significativas.

Abaixo encontram-se os gráficos obtidos para a produção obtida ao longo dos 12 dias de ensaio.

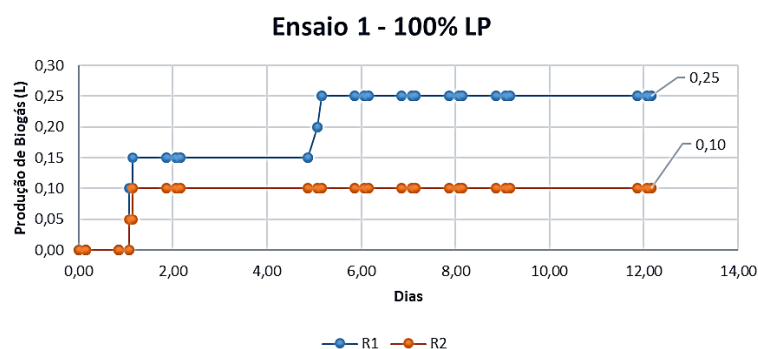


Figura A. 1 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 1 e 2, com substrato 100% LP.

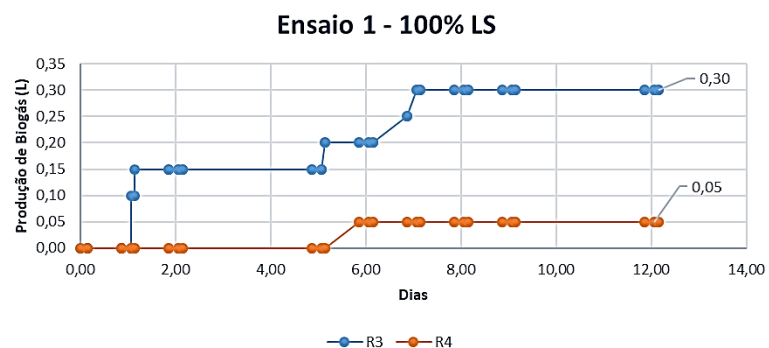


Figura A. 2 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 3 e 4, com substrato 100% LS.

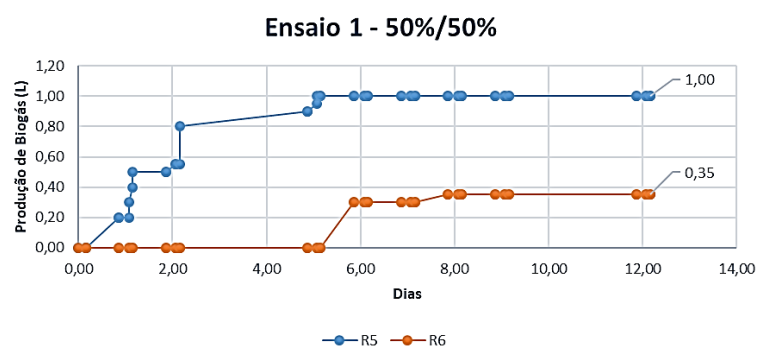


Figura A. 3 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 5 e 6, com substrato 50%/50%.

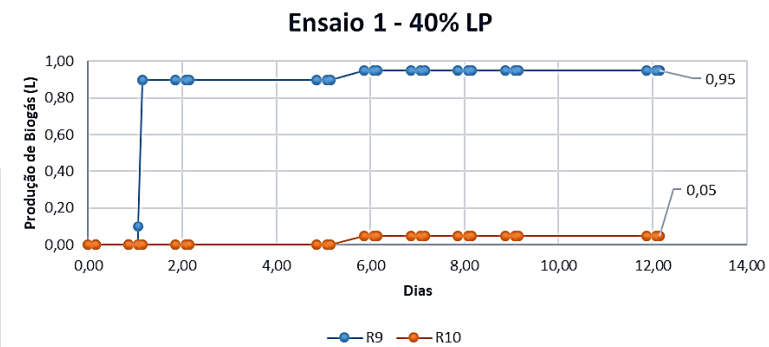


Figura A. 5 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 9 e 10, com substrato 40% LP.

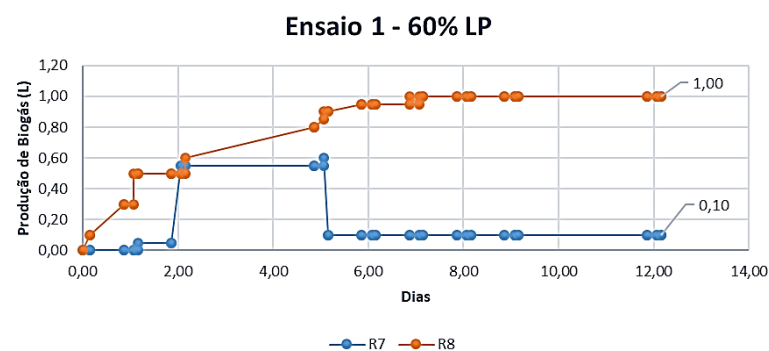


Figura A. 4 Resultados obtidos do ensaio 1 para os reatores 7 e 8, com substrato 60% LP.

Tendo em conta os gráficos individuais para cada substrato diferente, é de notar que não há qualquer resultado coerente, acabando por ser desprezados os resultados dos reatores que produziram menos biogás.

Assim sendo, e de forma a analisar o ensaio de uma forma mais global, na Figura A.6, encontram-se os 5 resultados mais representativos obtidos neste primeiro ensaio.

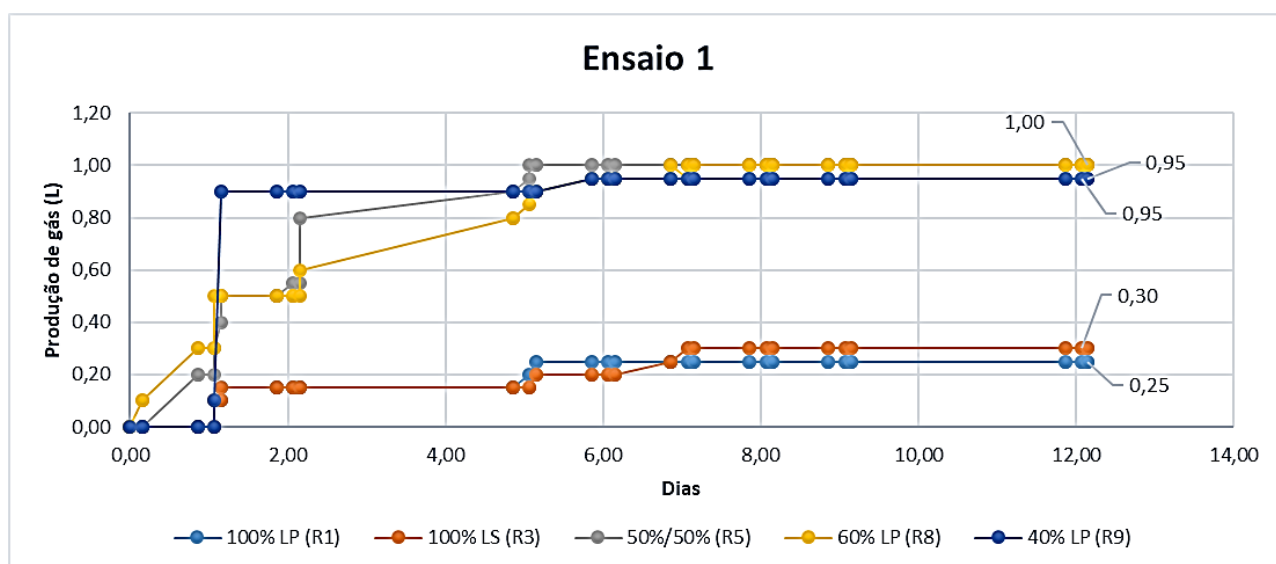


Figura A. 8 Gráfico global do ensaio 1, com os 5 resultados mais representativos.

Fazendo agora uma análise global a este ensaio, os reatores 8, 9 e 5 são os que apresentam uma maior produção de biogás, com a produção de cerca 1 L, ao fim de 12 dias. Já os reatores 1 e 3, foram os que produziram menos biogás, com valores máximos a rondar os 0,30 L.

Esperava-se valores mais distantes uns dos outros, de forma a poder tirar conclusões significativas e por isso mesmo, este ensaio foi descartado.

Assim sendo, a proporção usada nos ensaios seguintes foi de 50% de inóculo e 50% de substrato, enquanto que a anterior era 95% de inóculo e 5% de substrato.

Relativamente aos cálculos, estes foram feitos de forma semelhante aos anteriores, e através disso obteve-se um volume de substrato correspondente a 650 ml para um volume de 1,3 L. Uma vez que a proporção é de 50/50, o volume de inóculo é de 650 ml.

De forma a entender melhor, são apresentados na Tabela A.2 os volumes a adicionar de inóculo e substrato em cada reator.

Tabela A. 2 Volumes a adicionar de inóculo e substrato na proporção de 50% / 50%, respectivamente, a cada reator.

Volume a adicionar (mL)			
Reatores	Inóculo	LP	LS
100% LP (R1)	650	650	0
100% LP (R2)	650	650	0
100% LS (R3)	650	0	650
100% LS (R4)	650	0	650
50%/50% (R5)	650	325	325
50%/50% (R6)	650	325	325
60%LP (R7)	650	390	260
60%LP (R8)	650	390	260
40%LP (R9)	650	260	390
40%LP (R10)	650	260	390

B. Cálculo dos valores esperados

Nos ensaios realizados é essencial a medição da produção de biogás, no entanto torna-se bastante complicado evitar fugas. O cálculo dos valores esperados, tendo em conta a destruição dos sólidos voláteis obtidos nos resultados laboratoriais, presente na secção 5.1 permitiu identificar eventuais fugas e outras anomalias no processo.

No caso do ensaio 2, para a primeira amostra, 100% LP (R1):

$$ST \text{ iniciais} = 31033 \text{ mg/L}$$

$$SV \text{ iniciais} = 24110 \text{ mg/L}$$

$$SV \text{ finais} = 13163 \text{ mg/L}$$

Inicialmente foi calculada a percentagem de SV iniciais nos ST iniciais:

$$\frac{SV \text{ iniciais}}{ST \text{ iniciais}} \times 100 = \frac{24110}{31033} \times 100 = 78\%$$

Teoricamente, espera-se que 70% dos ST sejam SV, neste caso em concreto, 78% dos ST são SV, sendo 22% sólidos fixos.

Posteriormente, é calculada a conversão dos SV iniciais em SV finais.

$$\frac{SV \text{ finais}}{SV \text{ iniciais}} \times 100 = \frac{13163}{24110} \times 100 = 55\%$$

Dos SV iniciais, 55% permaneceram em SV finais, o que não corresponde ao valor teórico, sendo este cerca de 43%, valor esse encontrado na secção 3.5.

Uma vez que os SV iniciais correspondem a 100%, e uma vez que 55% permaneceu sob a forma de SV, 45% foram convertidos em biogás, estando longe do valor esperado, que teoricamente seria de 57%, valor esse encontrado na secção 3.5.

De forma a calcular a quantidade de biogás que se espera obter, foi necessário calcular os SV destruídos. Para tal:

$$SV \text{ destruídos} = SV \text{ iniciais} \times \text{Fração de Biogás} \times 10^{-3} = 24110 \times 0,45 \times 10^{-3} \\ = 10,95 \text{ g/L}$$

Uma vez que os valores de produção de biogás, estão compreendidos entre 0,75 e 1 m³/kg de SV destruídos, optou-se por um valor intermédio, ou seja, 0,9 m³/kg de SV destruídos, assim temos que:

$$0,9 = \frac{m^3}{kg \text{ de SV destruídos}} = \frac{m^3}{SV \text{ destruídos} \left(\frac{Kg}{L} \right) \times \text{Volume do reator (L)}}$$

Sabendo que o volume do reator é de 1 L, obtém-se:

$$0,9 = \frac{biogás (m^3)}{kg \text{ de SV destruídos}} = \frac{biogás (m^3)}{10,95 \times 10^{-3} kg/L \times 1L}$$

$$Produção de Biogás = 0,9 \times 10,95 \times 10^{-3} \times 10^3 = 9,85 \text{ L}$$

Neste segundo ensaio, na primeira amostra seria de esperar uma produção de 9,85 L de biogás.

É apresentado na Tabela B1, a produção esperada de biogás para os ensaios 2, 3 e 4.

Tabela B. 1 Produção de biogás esperada para os ensaios 2, 3 e 4.

Produção de biogás esperada (L)			
Reatores	Ensaio 2 (38 °C)	Ensaio 3 (40 °C)	Ensaio 4 (42 °C)
100% LP (R1)	9,85	7,60	5,53
100% LP (R2)	9,16	6,89	5,40
100% LS (R3)	2,39	1,47	2,23
100% LS (R4)	1,80	1,66	2,45
50%/50% (R5)	6,65	4,62	3,62
50%/50% (R6)	6,28	4,71	4,22
60%LP (R7)	7,84	5,14	5,04
60%LP (R8)	7,43	5,60	4,84
40%LP (R9)	6,00	4,24	3,53
40%LP (R10)	6,00	4,60	3,36

C. Redução da Matéria Volátil

Tendo em consideração o estudo a temperaturas diferentes, bem como a matéria inicial de cada ensaio, foi necessário o cálculo da redução da matéria volátil nos diferentes ensaios para o reator 1.

$$\text{Redução da matéria volátil} = \frac{SV \text{ iniciais} - SV \text{ finais}}{SV \text{ iniciais}}$$

Apresenta-se um exemplo de cálculo para cada temperatura para o reator 1. Os resultados para cada reator encontram-se na tabela C1.

Temperatura de 38 °C

$$\text{Redução da matéria volátil} = \frac{24110 - 13163}{24110} = 45\%$$

Temperatura de 40 °C

$$\text{Redução da matéria volátil} = \frac{18503 - 10060}{18503} = 45,6\%$$

Temperatura de 42 °C

$$\text{Redução da matéria volátil} = \frac{17247 - 11107}{17247} = 35,6\%$$

Tabela C. 1 Redução da matéria volátil (%) nos diferentes ensaios, para as diferentes amostras.

Redução da matéria volátil (%)			
Reatores	Ensaio 2 (38 °C)	Ensaio 3 (40 °C)	Ensaio 4 (42 °C)
100% LP (R1)	45	46	36
100% LP (R2)	42	43	35
100% LS (R3)	24	19	25
100% LS (R4)	19	21	27
50%/50% (R5)	42	34	30
50%/50% (R6)	39	35	34
60%LP (R7)	43	34	37
60%LP (R8)	42	36	36
40%LP (R9)	40	31	31
40%LP (R10)	40	33	30
Média	37	33	32

D. Qualidade do biogás

A qualidade do biogás fazia parte de um dos objetivos propostos neste estudo, no entanto, no decorrer do tempo, a análise não foi conseguida devido a problemas por parte do analisador de biogás.

Neste anexo encontram-se as medições conseguidas para cada ensaio.

Tabela D. 1 Qualidade do biogás durante o ensaio 2, a 38 °C.

Qualidade do gás do Ensaio 2 (38 °C)												
DATA	Dias	Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
29/abr	6	CH ₄ (%)	52,4	48,9	34,9	17,9	76	67,4	81	81	73,5	70,4
		H ₂ S (ppm)	24	27	48	12	38	17	65	56	27	17
		O ₂ (%)	6,7	7,3	2,1	13,2	3,1	5,5	1,8	2,1	4,2	4,1
		CO ₂ (%)	7	29	8	6	22	21	26	26	21	22
03/mai	10	CH ₄ (%)	76,3	60,7	35,3	2,2	67,8	68,1	80	75,7	4,5	6,3
		H ₂ S (ppm)	200	82	17	14	41	41	102	76	31	21
		O ₂ (%)	2,4	1,7	4,4	16,9	2,4	2,6	2,1	2,1	11,2	14,4
		CO ₂ (%)	30	33	14	6	26	26	27	27	5	6

Relativamente à análise feita a cada reator durante o ensaio 2, foram apenas conseguidas duas medições, respetivamente 6 e 10 dias após o início do ensaio (Tabela D.1). Tendo em conta apenas estas duas medições não é possível concluir nada de concreto no que se refere à evolução da percentagem de metano. Sendo este o constituinte mais abundante do biogás, não se verificou a mesma tendência em todos os reatores, ou seja, a percentagem de CH₄ aumentou nos reatores 1, 2, 3 e 6 e diminuiu nos restantes reatores, onde houve um decréscimo acentuado nos reatores 9 e 10. Sem medições no início nem no final não é possível avaliar se a variação de metano teve sempre a mesma tendência.

Ao fim de 6 dias de ensaio, os reatores 7 e 8 apresentaram a melhor percentagem de CH₄, com 81%. Ao fim de 10 dias o reator 7 continuou com a melhor percentagem em CH₄ com 80%. Seria esperado que nos reatores 1 e 2, com 100% de lamas primárias, se obtivesse maior concentração de metano no biogás do que nos reatores 7 e 8, com menor quantidade de lamas primárias (60 %), no entanto nestes reatores existe ainda uma grande concentração de lamas primárias e consequentemente de matéria orgânica.

Na Tabela D2 são apresentadas as medições realizadas durante o ensaio 3 a 40 °C.

Tabela D. 2 Qualidade do biogás durante o ensaio 3, a 40 °C.

Qualidade do gás do Ensaio 3 (40°C)												
DATA	Dias	Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22/mai	1	CH ₄ (%)	16,1	14,9	21,2	17,9	44,3	38,9	46,1	41,7	1,1	35,6
		H ₂ S (ppm)	10	22	5	3	6	9	9	9	7	4
		O ₂ (%)	15,1	14,3	14,4	15,9	8,7	10,1	7,8	9,8	19,9	11,8
		CO ₂ (%)	13	13	7	5	17	15	18	19	1	13
24/mai	3	CH ₄ (%)	26	40,8	26,8	12,5	76,4	66,1	31,7	30,8	0,9	1,9
		H ₂ S (ppm)	32	78	11	7	102	60	48	40	14	7
		O ₂ (%)	11,9	6,4	8,7	15,5	1,6	4,5	4,4	5,4	19,9	20,5
		CO ₂ (%)	16	21	12	6	26	21	18	17	0	1
29/mai	8	CH ₄ (%)	40,3	60,9	20,4	2,4	38,1	44,7	50,7	31,5	51,9	56,1
		H ₂ S (ppm)	3	14	9	4	24	38	29	39	36	128
		O ₂ (%)	6,3	2,4	4,9	15,4	9,9	3,5	7,3	2,8	3,7	1
		CO ₂ (%)	22	27	13	6	15	22	19	21	21	22
31/mai	10	CH ₄ (%)	46,8	63,1	15,9	2,9	18,3	34,1	30	26	47,6	46,9
		H ₂ S (ppm)	5	27	7	5	3	2	2	2	77	40
		O ₂ (%)	3,5	0,8	2,8	15,9	9	4,8	10,6	2,8	2,8	4,2
		CO ₂ (%)	20	25	13	5	15	17	15	18	21	17

Durante o ensaio 3, foram realizadas quatro medições a cada reator de forma a avaliar a qualidade de biogás que estava a produzir.

Desde o primeiro dia até ao décimo dia, nem todos os reatores obtiveram uma evolução da concentração de biogás constante, ou seja, nos casos dos reatores 1 e 2, ao longo do tempo a qualidade do biogás melhorava, o que não acontecia com os restantes reatores. No caso dos reatores 3, 5 e 6, do primeiro para o terceiro dia notou-se uma melhoria na qualidade do biogás, no entanto tendeu a decrescer ao longo do tempo. Quanto aos reatores 4, 7 e 8, apresentavam algumas variações ao longo do tempo, no entanto a qualidade do gás também tendeu a piorar. Por fim, os reatores 9 e 10, comportaram-se de forma semelhante aos primeiros dois reatores uma vez que do primeiro para o décimo dia a qualidade do biogás melhorou.

Uma das formas para justificar a variação de metano ao longo do metano deve-se ao facto de o filtro do analisador de biogás não estar devidamente limpo e para além disso existirem fugas nos reatores, as perdas de biogás e a possível entrada de oxigénio impedem a formação de biogás com melhor qualidade.

De uma forma geral, o reator que apresentou a melhor qualidade de biogás no início do ensaio 3 foi o reator 7, com 46,1% de CH₄ e ao fim de dez dias a melhor qualidade de biogás foi no reator 2 com 63,1% de CH₄. De facto, seria nos reatores 1 e 2, com 100%

de lamas primárias, e nos reatores 7 e 8, com 60 %, onde se esperaria maior produção de metano devido à maior concentração de lamas primárias e consequentemente de matéria orgânica.

Na Tabela D3 é por fim apresentada a qualidade medida para o ensaio 4, a 42 °C.

Tabela D. 3 Qualidade do biogás durante o ensaio 4, a 42 °C.

Qualidade do gás do Ensaio 4 (42 °C)												
DATA	Dias	Análise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
05/jul	10	CH4 (%)	24,1	51,2	6,4	2,2	7	26,5	14,1	38,6	31,8	67,9
		H2S (ppm)	1	2	1	1	1	1	1	0	0	122
		O2 (%)	3,9	3,3	3,1	16,2	7,8	5,6	7,9	2,7	4,4	0,7
		CO2 (%)	18	23	15	7	16	17	15	20	17	20
08/jul	13	CH4 (%)	17,5	43,2	2,5	1,6	3,9	18	6,2	33,1	25,5	60,8
		H2S (ppm)	7	5	2	1	0	2	2	2	10	77
		O2 (%)	3,9	2,2	7,3	17,4	13	3,8	8,1	2,7	5,1	3,1
		CO2 (%)	18	23	12	3	12	18	16	20	18	20
10/jul	15	CH4 (%)	13,7	35,1	2,5	1,9	7,6	12,6	4,4	26,6	19,6	0,9
		H2S (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		O2 (%)	7,3	3,3	8,8	18,2	7,8	7,8	8,1	3,6	9	18,2
		CO2 (%)	17	20	12	4	15	14	13	19	15	0
12/jul	17	CH4 (%)	8,7	17,7	2,2	2,1	10	9,3	1,1	24,1	15,3	60,8
		H2S (ppm)	0	0	0	1	99	19	6	6	3	9
		O2 (%)	7,1	7,9	10,8	16,6	5,8	5,9	9,8	1,9	3,2	4,2
		CO2 (%)	13	14	12	5	16	15	3	19	16	19
15/jul	20	CH4 (%)	3,1	6,8	3,5	2,4	15,3	6,8	3,1	21,9	12,3	62,1
		H2S (ppm)	6	3	2	4	206	20	10	6	5	34
		O2 (%)	16,6	11,4	11	17,4	5,4	7,9	12,1	2,7	5,7	5,5
		CO2 (%)	5	6	12	3	14	14	11	19	17	20

No início deste quarto ensaio, o analisador ainda não estava em funcionamento daí a análise realizada ter dado início ao fim de 10 dias. Foram realizadas cinco medições aos diferentes reatores.

Mais uma vez verificaram-se variações da concentração de metano ao longo do tempo, pelas razões acima mencionadas e por isso mesmo será feita apenas uma análise geral de como variou do dia 10 para o dia 20.

Assim sendo, à exceção dos reatores 4 e 5, em todos os outros a percentagem de metano diminuiu desde o dia 10 até ao dia 20, o que seria de esperar uma vez que a concentração de SV vai decrescendo ao longo do ensaio.

No reator 10, ao décimo quinto dia de ensaio, ocorreu um descida abrupta na percentagem de metano, devido ao facto de a válvula se encontrar fechada, por isso

mesmo o analisador apenas mediu a qualidade do biogás acumulado no garrafão sem contar com o que se formara no reator.

Neste ensaio, o reator que apresentou uma percentagem mais elevada de metano foi o R10, quer no início quer no final do ensaio, o que era esperado pois este reator contém apenas 40% de lamas primárias que são as mais ricas em matéria orgânica e consequentemente mais produtivas em metano.